



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**JOSÉ BANDEIRA BRASIL**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DA CHUVA E DA PRECIPITAÇÃO INTERNA EM  
FLORESTA TROPICAL SECA**

**FORTALEZA**

**2022**

JOSÉ BANDEIRA BRASIL

POTENCIAL ENERGÉTICO DA CHUVA E DA PRECIPITAÇÃO INTERNA EM  
FLORESTA TROPICAL SECA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semi-Árido

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Ph.D Eunice Maia de Andrade.

Coorientadora: Prof<sup>a</sup> Ph.D. Maria João Simas Guerreiro

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- B83p Brasil, José Bandeira.  
Potencial energético da chuva e da precipitação interna em floresta tropical seca / José Bandeira Brasil. –  
2022.  
108 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Profa. Dra. Eunice Maia de Andrade.  
Coorientação: Profa. Dra. Maria João Simas Guerreiro.
1. Separação de eventos de chuva. 2. Precipitação interna. 3. Energia cinética-intensidade da chuva. 4.  
Erosividade da chuva. 5. Região semiárida. I. Título.

CDD 630

---

JOSÉ BANDEIRA BRASIL

POTENCIAL ENERGÉTICO DA CHUVA E DA PRECIPITAÇÃO INTERNA EM  
FLORESTA TROPICAL SECA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semi-Árido

Aprovada em: 04/11/2022

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>a</sup>. Ph.D. Eunice Maia de Andrade (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup> Ph.D. Maria João Simas Guerreiro (Coorientadora)  
Universidade Fernando Pessoa, Porto, Portugal

---

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (Campus Maracanaú)

---

Prof<sup>a</sup> Dra. María Fernández-Raga  
Universidad de León (Espanha)

---

Prof. Dr. Jonathan Mota da Silva  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Agradeço a **Deus** pela oportunidade que me foi dada. Aos meus pais, José Teixeira Brasil e Maria Marleide Bandeira Brasil, aos meus irmãos Jocian Bandeira Brasil, Jocivan Bandeira Brasil e minha irmã Jocivânia Bandeira Brasil por sempre me apoiarem nesta trajetória. Obrigado a minha família, aos meus amigos (as) e a todos (as) que me ajudaram nessa caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me capacitado e mostrado o caminho que deveria seguir. Agradeço aos meus pais que são a base de toda a minha vida, que me abençoa e me aconselha sempre a seguir o caminho certo. Agradeço por seu carinho e por se preocupar tanto comigo. Agradeço também a minha família de maneira geral por estarem sempre presentes na minha vida, por me ajudarem no que precisar.

À Universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela convivência durante esses quatro anos do Doutorado. Agradecer aos professores desta instituição, em especial: Eunice Andrade, Pedro Medeiros, Alexandre Costa, José Carlos, e Fernando Lopes.

Agradeço à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME, pelo fornecimento dos disdrômetros e assistência técnica, em especial a João Bosco e Wagner Luiz.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Iguatu, pela realização da pesquisa de campo. Aos membros do grupo de pesquisa da professora Helba Palácio, em especial, José Ribeiro (Júnior), Jacques Filho, Matheus Moura, Makeison Moreira, Geovane Barbosa, Ruth, Mayara, Janielly, Zidane e Léo Cássio que contribuíram com a instalação e coleta dos dados.

À minha orientadora professora Ph.D. Eunice Maia de Andrade, por ter acreditado no meu potencial para realizar este trabalho e pela sua competência, ensinamentos, excelente orientação, confiança e amizade.

Aos coorientadores deste trabalho professor Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros e Prof<sup>a</sup> Ph.D, Maria João Simas Guerreiro, pela ajuda na organização das informações, pelas grandes dicas e excelente orientação.

À Prof<sup>a</sup> María Fernández-Raga pela ajuda no entendimento dos dados do disdrômetros, organização das informações e pelas grandes dicas.

A professora, Dra. Helba Araújo de Queiroz Palácio, pelo incentivo, ensinamentos, amizade e ter me recebido muito bem durante a realização do experimento, demonstrando total confiança em todo o período em que convivemos nesse trabalho de pesquisa.

à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela concessão de bolsas de estudo durante esses quatro anos.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa Massa (Manejo de Água e Solo no Semiárido) pelo excelente convívio nesses quatro anos do doutorado: Eunice Andrade, Fernando Lopes, Fredson, Diego, Emanuel, Jacques.

Aos colegas e amigos (a) das turmas de Mestrado e Doutorado em Engenharia Agrícola da UFC: Fredson, Wilner, Juarez, Willame, Pedro Alencar, Mayara, Paulilo, Thayslan, Jacques, Geovane, Matheus Moura, Makeison Moreira. O meu muito obrigado.

Agradeço aos meus amigos (as) particulares que fizeram parte dessa trajetória indiretamente, porém não com menos mérito.

A todos, que de alguma forma contribuíram para minha formação, desde a infância até os dias de hoje. Deixo o meu muito OBRIGADO!

## RESUMO

A escassez hídrica em regiões tropicais secas é um fato, que pode ser agravada pelas mudanças climáticas. Portanto, a caracterização dos eventos de chuva é necessária para uma melhor avaliação dos processos hidrológicos. Para preencher esta lacuna, o presente estudo fundamentou-se nos seguintes objetivos: (i) determinar o tempo mínimo entre eventos - MIET de chuva; (ii) identificar como a vegetação da floresta tropical seca – FTS define a precipitação interna - TF em diferentes estágios de desenvolvimento do dossel; (iii) investigar o poder atenuante da FTS no poder de erosividade da chuva; (iv) avaliar a previsão gerada pelos ajustes de dois modelos da literatura para estimar energia cinética (EC) e potencial de erosividade (EI30) da precipitação total (P) e TF; (v) Propor um novo modelo de EC da P e TF com base em dados medidos em condições de campo. Doze anos consecutivos de dados de P em intervalo de 5 minutos foram coletados e agrupados em diferentes (MIETs) - 15 min, 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h e 24 h em região semiárida do Nordeste do Brasil. Para avaliar a distribuição da energia das gotas de chuva em diferentes estágios de desenvolvimento do dossel, instalamos dois disdrômetros, um para registrar - P e outro sob o dossel da FTS para registrar - TF. Os dados foram coletados de dezembro/2019 a maio/2021, totalizando 95 eventos naturais de P e TF. Os resultados confirmam que a inclusão ou exclusão de eventos de ponta única (EPU) na escolha do MIET mais adequado afetou o número de eventos de chuva e respectivas características; o número de eventos de ponta única diminuiu até um MIET de 3 h, mas não mostrou diferença acima de um MIET de 6h. O MIET de 6 h é o mais adequado para caracterizar a distribuição das chuvas nesta região semiárida tropical. No início da estação chuvosa quando a densidade foliar é baixa, uma fração maior da chuva foi convertida em TF, a qual diminui à medida que a densidade foliar aumenta. Para eventos superiores a 3 mm, o número de gotas de TF foi sempre superior ao de P e com diâmetros menores, independente do estágio de desenvolvimento do dossel. Tal resultado indica fragmentação das gotas de chuva pelo dossel da vegetação. A relação entre EC e intensidade média de P e TF medida é melhor expressa em função do tempo ( $J m^{-2} h^{-1}$ ), através de um modelo linear ( $R^2 > 0.98 - P = 0.000$ ). Dentre os modelos utilizados, observou-se que o modelo Wischmeier e Smith (WS) foi o que mais subestimou os valores de EC e EI30 de P e TF. O modelo proposto de EC pela variação temporal da intensidade apresentou o melhor ajuste aos dados medidos de EC e EI30 de P e TF em comparação ao modelo WS. Diante dessa não adequação dos modelos de EC aos dados de P e TF, propomos um novo modelo, calibrado com 50% dos dados medidos de altura e intensidade média de P e

depois validado com os outros 50%. Verificou-se que o novo modelo subestima a EC em 5% ( $R^2 = 0,98$ ) para P e superestima em 8% ( $R^2 = 0.97$ ) para TF, mostrando ser uma alternativa em estudos de processos erosivos em regiões semiáridas com características similares. Além disso, o dossel da FTS reduz a EC medida em 25% e a EI30 em 39%, comprovando que dossel da vegetação arbórea protege a superfície do solo do impacto das gotas da chuva, além de ser uma cobertura natural do solo eficaz para proteção contra a erosão do solo.

**Palavras-chave:** separação de eventos de chuva; floresta tropical seca; precipitação interna; disdrômetro; energia cinética-intensidade da chuva; erosividade da chuva; região semiárida.

## ABSTRACT

Water scarcity in dry tropical regions is a fact that can be aggravated by climate change. Therefore, the characterization of rainfall events is necessary for a better evaluation of hydrological processes. To fill this gap, the present study was based on the following objectives: (i) to determine the minimum time between events - rain MIET; (ii) identify how the vegetation of the dry rain forest - FTS defines the internal precipitation - TF at different stages of canopy development; (iii) investigate the attenuating power of FTS in the erosivity power of rain; (iv) evaluate the prediction generated by the adjustments of two models in the literature to estimate kinetic energy (EC) and erosivity potential (EI30) of total precipitation (P) and TF; (v) Propose a new P and TF EC model based on data measured in field conditions. Twelve consecutive years of P data in an interval of 5 minutes were collected and grouped into different (MIETs) - 15 min, 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h and 24 h in semiarid region of northeastern Brazil. To evaluate the energy distribution of raindrops at different stages of canopy development, we installed two disdrometers, one to register - P and the other under the FTS canopy to register - TF. Data were collected from December/2019 to May/2021, totaling 95 natural events of P and TF. The results confirm that the inclusion or exclusion of single-end events (EPU) in the choice of the most appropriate MIET affected the number of rainfall events and their characteristics; the number of single-end events decreased to a 3-hour MIET, but showed no difference above a 6h MIET. The 6-hour MIET is the most appropriate to characterize rainfall distribution in this tropical semiarid region. At the beginning of the rainy season when leaf density is low, a larger fraction of the rain was converted into TF, which decreases as leaf density increases. For events greater than 3 mm, the number of ST drops was always higher than p and with smaller diameters, regardless of the stage of canopy development. This result indicates fragmentation of raindrops by the canopy of vegetation. The relationship between EC and mean intensity of P and Measured ST is better expressed as a function of time ( $J m^{-2} h^{-1}$ ), through a linear model ( $R^2 > 0.98 - P = 0.000$ ). Among the models used, it was observed that the Wischmeier and Smith (WS) model was the one that most underestimated the EC and EI30 values of P and TF. The proposed model of EC by temporal variation of intensity showed the best fit to the measured data of EC and EI30 of P and TF compared to the WS model. Faced with this non-adequacy of the EC models to the P and TF data, we propose a new model, calibrated with 50% of the measured data of height and average intensity of P and then validated with the other 50%. It was found that the new model underestimates the EC by 5% ( $R^2 = 0.98$ ) for P and overestimates

it by 8% ( $R^2 = 0.97$ ) for TF, proving to be an alternative in studies of erosion processes in semiarid regions with similar characteristics. In addition, the FTS canopy reduces the measured EC by 25% and the EI30 by 39%, proving that the canopy of tree vegetation protects the soil surface from the impact of raindrops, as well as being an effective natural ground cover to protect against soil erosion.

**Keywords:** separation of rainfall events; tropical dry forest; throughfall; disdrometer; kinetic energy-intensity of rainfall; rainfall erosivity; semi-arid region.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização da Bacia Experimental de Iguatu (BEI), Nordeste do Brasil.....	26
Figura 2 -	Distribuição da precipitação total (P), duração da chuva (D), intensidade média (I) e intensidades máximas (I5, I30 e I60) para eventos de chuva com e sem eventos de ponta única (EPU), em função dos tempos mínimos entre eventos (MIETs, de 15 min a 24.....	33
Figura 3 -	Frequência de ocorrência dos eventos de ponta única (%) e distribuição da altura total da chuva em função do tempo mínimo entre eventos (MIET de 15 min a 24 h).....	34
Figura 4 -	Relação entre o tempo mínimo entre eventos (MIETs, de 15 min a 24 h) e o número de eventos de chuva. A linha tracejada verde indica MIET de 6 h, quando não há mais diferença estatística entre a análise com e sem eventos de ponta única (EPU).....	35
Figura 5 -	Distribuição de frequência da precipitação total, duração, intensidade média e tempo entre eventos (IET) para tempo mínimo entre eventos (MIET) de 6 h.....	38
Figura 6 -	Distribuição da precipitação total, duração e intensidade média com base em um tempo mínimo entre eventos de 6 h.....	41
Figura 7 -	Localização da área experimental no município de Iguatu-Ceará, Nordeste do Brasil.....	49
Figura 8 -	Configuração experimental da instalação dos equipamentos: (a) Painel solar, (b) caixa onde estão as baterias, conversores e Raspberry, (c) disdrômetro em campo aberto para monitorar a precipitação total, (d, e) vista do disdrômetro sob a vegetação da FTS, (f) pluviógrafo de balança para monitorar a precipitação total.....	51
Figura 9 -	Registros fotográficos das mudanças na densidade foliar durante o período de estudo: (a, b) durante o desenvolvimento foliar, (c) após o desenvolvimento total da densidade foliar e (d) período de queda das folhas.....	54
Figura 10 -	Frequência de ocorrência dos eventos de chuva monitorados.....	56

Figura 11 -	Relação entre a precipitação total (P) e precipitação interna (TF) nos três estágios de desenvolvimento do dossel: (a, b - $P \leq 5,0$ mm) e (c, d - $P > 5,0$ mm).....	57
Figura 12 -	Relação do número total de gotas da precipitação total (P) e precipitação interna (TF) em relação à precipitação total (P) para os três estágios de desenvolvimento do dossel para (a) $P \leq 5,0$ mm e (b) $P > 5,0$ mm.....	59
Figura 13 -	Relação do número total de gotas da precipitação total (P) e da precipitação interna (TF) nos três estágios de desenvolvimento do dossel: (a, b - $P \leq 5,0$ mm) e (c, d - $P > 5,0$ mm).....	61
Figura 14 -	Relação do volume total de gotas da precipitação total (P) e da precipitação interna (TF) em diferentes estágios de desenvolvimento do dossel: (a, b - $P \leq 5,0$ mm) e (c, d - $P > 5,0$ mm).....	63
Figura 15 -	Localização da microbacia experimental de Iguatu (a), disdrômetro em campo aberto para monitorar a chuva total (b), disdrômetro sob a vegetação para monitorar a precipitação interna (c).....	70
Figura 16 -	Relação entre intensidade média da chuva e energia cinética (EC) medida pelo disdrômetro: (a, b) energia cinética por unidade de área e altura de chuva – (EC mm de P e TF) e (c, d) energia cinética por unidade de área e tempo – (Ec tempo de P e TF).....	77
Figura 17 -	Modelos alternativos de energia cinética medida pelo disdrômetro em função da chuva e I30 máx de P e TF total.....	80
Figura 18 -	Modelos alternativos de erosividade da chuva (EI30) em função da chuva e I30 máx de P e TF total.....	82
Figura 19 -	Energia cinética de P e TF medida versus modelos da literatura.....	84
Figura 20 -	Erosividade de P e TF medida versus modelos da literatura.....	86
Figura 21 -	Efeito atenuante da FTS nos valores de energia cinética e erosividade medida versus estimada de P e TF.....	80
Figura 22 -	Nova equação de energia cinética de P e TF ajustada com base na equação original de WS.....	90

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 -	Descrição das funções de distribuição de probabilidade ajustadas aos dados de chuva.....	28
Tabela 2 -	Estatísticas descritivas das características dos eventos de chuva com e sem eventos de ponta única (EPU) para tempos mínimos entre eventos (MIETs) variando de 15 min a 24 h.....	31
Tabela 3 -	Características dos eventos de chuva em função do tempo mínimo entre eventos (MIETs, de 15 min a 24 h).....	32
Tabela 4 -	Características dos eventos de chuva com base no tempo mínimo entre eventos de 6 horas.....	40
Tabela 5 -	Classes de diâmetro e velocidades das gotas registradas no disdrômetro	52
Tabela 6 -	Resumo dos três estágios de desenvolvimento do dossel em função da altura da chuva e densidade do dossel.....	54
Tabela 7 -	Estatística descrita dos eventos de chuva monitorados.....	56
Tabela 8 -	Duração média da precipitação interna após a cessação de um evento de chuva.....	58
Tabela 9 -	Estatísticas descritivas das características da chuva (P) e precipitação interna TF).....	75

## LISTA DE SIGLAS

MIET	Tempo Mínimo Entre Eventos
EPU	Eventos de Chuva de Ponta Única
BEI	Bacia Experimental de Iguatu
FTS	Floresta Tropical Seca
AD	Anderson-Darling
TF	Precipitação Interna
P	Precipitação Total
VT	Volume Total
D	Diâmetro das Gotas
V	Velocidade das Gotas
EC	Energia Cinética
EI30	Potencial de Erosividade
WS	Wischmeier e Smith
VT	Variação Temporal da Intensidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>HIPÓTESES.....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>ESTRUTURAÇÃO DA TESE.....</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>DEFINIÇÃO DE EVENTOS DE CHUVA EM UM AMBIENTE SEMIÁRIDO TROPICAL PELO TEMPO MÍNIMO ENTRE EVENTOS DE CHUVA.....</b>	<b>22</b>
<b>5.1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>24</b>
<b>5.2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
<b>5.3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>30</b>
<b>5.4</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>EFEITOS DO DOSSEL NA PARTIÇÃO DA CHUVA E DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS GOTAS DA PRECIPITAÇÃO INTERNA EM FLORESTA TROPICAL SECA.....</b>	<b>45</b>
<b>6.1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>47</b>
<b>6.2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>49</b>
<b>6.3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>6.4</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>ENERGIA CINÉTICA E POTENCIAL DE EROSIVIDADE DA PRECIPITAÇÃO INTERNA EM REGIÃO SEMIÁRIDA.....</b>	<b>66</b>
<b>7.1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>68</b>
<b>7.2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>69</b>
<b>7.3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>75</b>
<b>7.4</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>91</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>93</b>
<b>9</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>94</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>95</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A escassez de água nas regiões tropicais secas, que se espera agravar em cenários de mudanças climáticas, gera a necessidade de caracterização espacial e temporal das chuvas com base em eventos para um melhor entendimento dos processos hidrológicos associados e para a definição de estratégias de adaptação humana. Diante do cenário desafiador enfrentado pelas regiões semiáridas tropicais, em que a chuva natural é a principal entrada de água no sistema, o entendimento dos processos hidrológicos é fundamental como suporte para as tomadas de decisões.

Para uma melhor compreensão desses processos, a primeira etapa é determinar o que é um evento individual de chuva. O tempo mínimo entre eventos (MIET), por ser um critério comumente utilizado em estudos hidrológicos, surge como uma solução para definir um evento de chuva. O MIET é definido como um período mínimo sem chuva entre o fim de um evento e o início do próximo. A mudança no MIET altera o número de eventos de chuva gerados, as características desses eventos, ou seja, a altura total do evento, intensidade média e duração.

Após a escolha do melhor MIET para definir eventos de chuva em uma região semiárida tropical, informações mais precisas sobre as características das chuvas em escala de eventos estatisticamente independentes podem ser avaliadas. Assim, o conhecimento das características das chuvas e de suas interações com a vegetação é essencial para o entendimento dos processos sob o dossel da vegetação. Além disso, é necessário entender o potencial da vegetação em interceptar a água da chuva, bem como a capacidade da vegetação em atenuar os eventos de precipitação interna que atingem o solo da floresta.

A vegetação altera a distribuição espaço-temporal da precipitação interna em termos de quantidade de chuva, intensidade da chuva, diâmetro da gota, velocidade da gota e energia cinética, modificando os processos hidrológicos nos solos das florestas. Em diferentes partes do globo, existem estudos que compararam a distribuição do tamanho das gotas da chuva da precipitação interna em diferentes tipos de árvores e plantações. No entanto, a distribuição dos pontos de gotejamento do dossel sob a vegetação nas características da energia cinética e erosividade da precipitação interna é pouco conhecida. Outro processo que necessita ser investigado é como as gotas da redistribuição da chuva pela vegetação impactam a distribuição da energia cinética medida sob o dossel da Floresta Tropical Seca em relação à chuva total e seu potencial de erosividade.

Em geral, as contribuições científicas deste estudo são úteis para entender como a escolha de diferentes MIET afetam a descrição/entendimento das características da chuva em escala de eventos estatisticamente independentes; quantificar o impacto das características da chuva e estágio de desenvolvimento do dossel da FTS na partição da chuva e redistribuição das gotas da precipitação interna; entender a dinâmica de distribuição da energia cinética de chuva total e precipitação interna na escala de evento de chuva em medida direta. Por fim, os resultados servirão de base para futuras investigações do potencial de erosividade do solo; estudos hidrológicos relacionados às características de chuva total e precipitação interna; definição de práticas de conservação do solo e da água ante às mudanças climáticas.

## 2 HIPÓTESES

### Hipóteses

O estudo-caso de uma região semiárida tropical no Nordeste do Brasil, utilizando o tempo mínimo entre eventos de chuva (MIET), pode ser utilizado para separar e padronizar eventos de chuva estatisticamente independentes como suporte para avaliação dos processos hidrológicos.

A variabilidade temporal do tamanho das gotas da precipitação interna e a relação diâmetro-velocidade das gotas são controladas principalmente pelas características dos estágios de desenvolvimento do dossel.

A distribuição do tamanho das gotas e energia cinética é diferente quando analisadas sob o dossel e fora do dossel.

Os modelos de energia cinética padrões na literatura podem ser usados para avaliar o potencial energético das gotas da chuva e da precipitação interna em região semiárida de baixa latitude.

## 3 OBJETIVOS

### Geral

Determinar o tempo mínimo entre eventos de chuva com foco em identificar como a vegetação da floresta tropical seca – FTS define a precipitação interna em diferentes estágios de desenvolvimento do dossel e investigar o poder atenuante da FTS no poder de erosividade da chuva.

### Específicos

- (i) Caracterizar os eventos de chuva em região semiárida tropical empregando-se o tempo mínimo entre eventos de chuva (MIET) de chuva;
- (ii) identificar como a vegetação da floresta tropical seca – FTS define a precipitação interna - TF em diferentes estágios de desenvolvimento do dossel;
- (iii) investigar o poder atenuante da FTS no poder de erosividade da chuva;

(iv) Avaliar a predição gerada pelos ajustes de dois modelos da literatura para estimar energia cinética (EC) e potencial de erosividade (EI30) da precipitação total (P) e TF;

(v) Propor um novo modelo de EC da P e TF com base em dados medidos em condições de campo;

(vi) Gerar um banco de dados para a área em estudo, com informações sobre altura de chuva (mm), duração da chuva (h), intensidade média da chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ ), intensidade máxima de chuva durante um período de 30 minutos do evento ( $I_{30 \text{ máx}} \text{ mm h}^{-1}$ ), diâmetro da gota (mm), velocidade da gota (m/s), distribuição do tamanho da gota, número total de gotas, volume total de gotas ( $\text{mm}^3$ ), energia cinética total do evento de chuva ( $\text{J m}^{-2}$ ) tanto para chuva total (P) como para a precipitação interna (TF), servindo de base para estudos futuros.

#### 4 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

A parte inicial é composta de uma introdução geral, hipótese e objetivos do trabalho. Diante disso, a redação desta tese de doutorado nos motivou a escrever três capítulos. O primeiro capítulo intitulado: Definição de eventos de chuva em um ambiente semiárido tropical pelo tempo mínimo entre eventos de chuva. Ainda não há consenso sobre o método mais adequado para separar os eventos de chuva de um banco de dados contínuo, embora o tempo mínimo entre eventos (MIET) seja um critério comumente utilizado. Neste estudo, identificamos o MIET mais adequado com base em dados de chuva medidos continuamente em intervalos de 5 minutos ao longo da última década (2009-2020) na região semiárida do nordeste do Brasil. Neste estudo, apresentamos dados detalhados e informações sobre as características da precipitação em uma base de eventos, contribuindo para um melhor entendimento da hidrologia em ambientes semiáridos.

Após definir o melhor MIET para a área em estudo (6 h), o segundo capítulo foi desenvolvido. Efeitos do dossel na partição da chuva e distribuição do tamanho das gotas da precipitação interna em floresta tropical seca. Nesse estudo, dois disdrômetros foram instalados, um em campo aberto para registrar a precipitação total – P e um segundo sob o dossel da floresta tropical seca - FTS para registrar a precipitação interna - TF.

Ambos os disdrômetros (P-TF) registraram as seguintes características da chuva: altura de chuva (mm), intensidade média da chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ ), duração da chuva (h), intensidade máxima de chuva durante um período de 30 minutos do evento ( $I_{30} \text{ máx mm h}^{-1}$ ), tamanho médio das gotas, diâmetro da gota (mm), velocidade da gota (m/s), distribuição do tamanho da gota, número total de gotas, volume total de gotas ( $\text{mm}^3$ ) e energia cinética total do evento de chuva ( $\text{J m}^{-2}$ ). Essas características foram registradas em intervalos de 1 minuto. Com essas informações disponíveis, é possível se conhecer o potencial energético de redistribuição das gotas da precipitação interna, além do potencial da vegetação para interceptar a chuva e o papel atenuante da vegetação decídua da FTS no tamanho e velocidade das gotas da precipitação interna em diferentes estágios de desenvolvimento do dossel.

Com os dados do disdrômetro, o terceiro capítulo foi desenvolvido. Energia cinética e potencial de erosividade da precipitação interna em região semiárida. Este trabalho foi desenvolvido devido à escassez de medições diretas e contínuas. Assim, relações empíricas ainda são largamente utilizadas na estimativa da energia cinética - EC e seu potencial de erosividade – EI30 em ambientes semiáridos. Observou-se que o modelo de Wischmeier e

Smith (WS) foi o que mais subestimou os valores de EC e EI30 de P e TF. O modelo alternativo de EC pela variação temporal da intensidade apresentou o melhor ajuste aos dados medidos de EC e EI30 de P e TF para a região de estudo quando comparado com o modelo WS. Por fim, calibramos e validamos um modelo de energia cinética em função dos dados medidos de altura e intensidade média de P. O modelo validado, subestima a EC em 5% ( $R^2 = 0,98$ ) para P e superestima em 8% ( $R^2 = 0.97$ ) para TF, mostrando-se uma alternativa para substituir o modelo original de WS em regiões semiáridas com características similares.

Article

# Minimum Rainfall Inter-Event Time to Separate Rainfall Events in a Low Latitude Semi-arid Environment

 José Bandeira Brasil <sup>1</sup>, Maria Simas Guerreiro <sup>2,\*</sup>, Eunice Maia de Andrade <sup>3</sup>, Helba Araújo de Queiroz Palácio <sup>4</sup>, Pedro Henrique Augusto Medeiros <sup>4</sup> and Jacques Carvalho Ribeiro Filho <sup>1</sup>
<sup>1</sup> Department of Agricultural Engineering, Federal University of Ceará–UFC, Fortaleza 60020-181, Brazil; josebandeira@alu.ufc.br (J.B.B.); jacquesfilho@alu.ufc.br (J.C.R.F.)

<sup>2</sup> FP-ENAS, University Fernando Pessoa, Porto 4249-004, Portugal

<sup>3</sup> Department of Soil and Water Conservation, Federal University of the Semi-Arid Region, Mossoró, 59625-900, Brazil; eunice.andrade@ufersa.edu.br

<sup>4</sup> Federal Institute of Education, Science and Technology of Ceará, Iguatu 63500-000, Brazil; helbarajujo@ifce.edu.br (H.A.d.Q.P.); phamedeiros@ifce.edu.br (P.H.A.M.)

\* Correspondence: mariajao@ufp.edu.pt

**Abstract:** Water scarcity in dry tropical regions is expected to intensify due to climate change. Characterization of rainfall events is needed for a better assessment of the associated hydrological processes, and the proposition of adaptation strategies. There is still no consensus on the most appropriate method to separate rainfall events from a continuous database, although the minimum inter-event time (MIET) is a commonly used criterion. Semi-arid regions of low latitudes hold a distinct rainfall pattern compared to their equivalent at higher latitudes; these seasonally dry tropical forests experience strong spatial–temporal variability with intense short-duration rainfall events, which, in association with high energy surplus and potential evaporation, leads to an atmospheric water deficit. In this study, we identified the most adequate MIET based on rainfall data continuously measured at 5-min intervals over the last decade (2009–2020) in the semi-arid northeast of Brazil. The rainfall events were grouped according to different MIETs: 15 min, 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h, and 24 h to determine rainfall depth, duration and intensity at intervals of 5, 30, and 60 min, time between events, and respective temporal distribution, with and without single tip events. Including single tip events in the dataset affected the number of rainfall events and respective characteristics up to a MIET of 3 h. A MIET of 6 h is the most appropriate to characterize the rainfall distribution in this tropical semi-arid region. Three classes were defined based on rainfall depth, duration, and intensity: I-small events (77% below 40 mm and 32 mm/h), II-high intensity events (3% between 36 and 76 mm/h), III-longer events of higher depth (20%). This study is useful for understanding how the MIET relates to other ecohydrological processes and provides more precise information on the rainfall characteristics at the event scale.

**Keywords:** rainfall characteristics; rain events separation; tropical dry regions; hydrological processes

**Citation:** Brasil, J.B.; Guerreiro, M.S.; Andrade, E.M.d.; Palácio, H.A.d.Q.; Medeiros, P.H.A.; Ribeiro Filho, J.C. Minimum Rainfall Inter-Event Time to Separate Rainfall Events in a Low Latitude Semi-arid Environment. *Sustainability* **2022**, *14*, x. <https://doi.org/10.3390/su14031721>

Academic Editor: Andrea Zerboni

Received: 21 December 2021

Accepted: 28 January 2022

Published: date

**Publisher’s Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Dry regions lie on approximately 47% of the earth’s surface [1] and are concentrated at latitudes above 25°, although they exist in almost all biomes and climatic zones of the globe. In the northeast of Brazil, an extensive area of approximately 1 Mkm<sup>2</sup>, extending from latitudes −3° to −16°, represents the main tropical semi-arid ecoregion in South America and is home to over 26 million inhabitants [2].

Rainfall depth, duration, and intensity have an impact on hydrologic processes such as interception [3–8], infiltration [9], runoff [10–12], soil loss [13–15], soil moisture [16–18], and an impact on ecosystem services [19,20]. In view of the challenging climate change

---

## 5 DEFINIÇÃO DE EVENTOS DE CHUVA EM UM AMBIENTE SEMIÁRIDO TROPICAL PELO TEMPO MÍNIMO ENTRE EVENTOS DE CHUVA

---

**Resumo:** Espera-se que a escassez de água em regiões tropicais secas se intensifique devido às mudanças climáticas. A caracterização dos eventos de chuva é necessária para uma melhor avaliação dos processos hidrológicos associados e a proposição de estratégias de adaptação. Ainda não há consenso sobre o método mais adequado para separar os eventos de chuva de um banco de dados contínuo, embora o tempo mínimo entre eventos (MIET) seja um critério comumente utilizado. Neste estudo, identificamos o MIET mais adequado com base em dados de chuva medidos continuamente em intervalos de 5 minutos ao longo da última década (2009-2020) na região semiárida do nordeste do Brasil. Os eventos de chuva foram agrupados de acordo com diferentes MIETs: 15 min, 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h e 24 h para determinar a altura, duração, intensidade média e máxima da chuva em intervalos de 5, 30 e 60 min, tempo entre eventos, com e sem eventos de ponta única. A inclusão de eventos de ponta única no conjunto de dados afetou o número de eventos de chuva e suas respectivas características até um MIET de 3 h. Um MIET de 6 h é o mais adequado para caracterizar a distribuição das chuvas nesta região semiárida tropical. Três classes foram definidas com base na altura, duração e intensidade da chuva: I-eventos pequenos (77% abaixo de 40 mm e 32 mm/h), II-eventos de alta intensidade (3% entre 36 e 76 mm/h), III-eventos mais longos de maior altura (20%). Este estudo é útil para entender como o MIET se relaciona com outros processos ecohidrológicos e fornece informações mais precisas sobre as características das chuvas na escala de eventos.

**Palavras-chave:** Características das chuvas; separação de eventos de chuva; funções de distribuição de probabilidade; regiões tropicais secas. processos hidrológicos

---

## **Definition of rainfall events in a tropical semi-arid environment by the minimum rainfall inter-event time**

---

**Abstract:** Water scarcity in dry tropical regions is expected to intensify due to climate change. Characterization of rainfall events is needed for a better assessment of the associated hydrological processes, and the proposition of adaptation strategies. There is still no consensus on the most appropriate method to separate rainfall events from a continuous database, although the minimum inter-event time (MIET) is a commonly used criterion. Semi-arid regions of low latitudes hold a distinct rainfall pattern compared to their equivalent at higher latitudes; these seasonally dry tropical forests experience strong spatial–temporal variability with intense short-duration rainfall events, which, in association with high energy surplus and potential evaporation, leads to an atmospheric water deficit. In this study, we identified the most adequate MIET based on rainfall data continuously measured at 5-min intervals over the last decade (2009–2020) in the semi-arid northeast of Brazil. The rainfall events were grouped according to different MIETs: 15 min, 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h, and 24 h to determine rainfall depth, duration and intensity at intervals of 5, 30, and 60 min, time between events, and respective temporal distribution, with and without single tip events. Including single tip events in the dataset affected the number of rainfall events and respective characteristics up to a MIET of 3 h. A MIET of 6 h is the most appropriate to characterize the rainfall distribution in this tropical semi-arid region. Three classes were defined based on rainfall depth, duration, and intensity: I-small events (77% below 40 mm and 32 mm/h), II-high intensity events (3% between 36 and 76 mm/h), III-longer events of higher depth (20%). This study is useful for understanding how the MIET relates to other ecohydrological processes and provides more precise information on the rainfall characteristics at the event scale.

**Keywords:** rainfall characteristics; separation of rainfall events; probability distribution functions; dry tropical regions; hydrological processes

## 5.1 INTRODUÇÃO

As regiões secas ocupam aproximadamente 47% da superfície terrestre (Koutroulis, 2019) e concentram-se em latitudes acima de 25°, embora existam em quase todos os biomas e zonas climáticas do globo. No nordeste do Brasil, uma extensa área de aproximadamente 1 Mkm<sup>2</sup>, estendendo-se das latitudes -3° a -16°, representa a principal ecorregião tropical semiárida da América do Sul e abriga mais de 26 milhões de habitantes (Sudene, 2017). A região é caracterizada por um déficit hídrico de 9 a 10 meses por ano (Guerreiro et al., 2021), chuvas com alta variabilidade espacial e temporal e elevada intensidade (Marengo et al., 2017).

A altura, duração e intensidade da chuva têm um impacto nos processos hidrológicos, como interceptação (Medeiros et al., 2009; Zhang et al., 2015, 2016; Brasil et al., 2018, 2020; Nívar, 2020), infiltração (Figueiredo et al., 2016), escoamento (Pathak et al., 2013; Santos et al., 2016; 2017), perda de solo (Medeiros; Araújo, 2014; Ribeiro Filho et al., 2017; Santos et al., 2018), energia cinética (Lima et al., 2013), umidade do solo (Costa et al., 2013; 2016; Rascón-Ramos et al., 2021), e impactos nos serviços ecossistêmicos (Andrade et al., 2020a; Guerreiro et al., 2021). Diante dos cenários desafiadores de mudanças climáticas projetados para regiões semiáridas, a variabilidade espacial e temporal das chuvas precisa ser caracterizada por eventos para melhor compreensão dos processos hidrológicos associados e para lidar com a escassez hídrica.

A maioria dos métodos de separação de eventos de chuva são definidos com base no escoamento (Molina-Sanchis et al., 2016), apesar de sua importância também para outros processos hidrológicos (Dunkerley, 2008; Ignaccolo; De Michele, 2010). Ainda assim, não há consenso sobre o método mais adequado para separar os eventos de chuva de um banco de dados contínuo (Dunkerley, 2008; Molina-Sanchis et al., 2016; Freitas et al., 2020). Um critério comum para separar os eventos de chuva em estudos hidrológicos é o tempo mínimo entre eventos (MIET) (Restrepo-Posada e Eagleson, 1982; Dunkerley, 2008; Medina-Cobo et al., 2016; Molina-Sanchis et al., 2016; Chin et al., 2016; Barbosa et al., 2018; Freitas et al., 2020; Dunkerley, 2021), que consiste no período mínimo de seca entre as ocorrências de chuva que os caracteriza como eventos independentes (Dunkerley, 2008). Assim, duas ocorrências de chuva separadas por um período sem chuva menor que o MIET é considerado como um evento único (Restrepo-Posada e Eagleson, 1982; Nojumuddin et al., 2018; Onderka et al., 2020).

Os valores de MIET apresentados na literatura variam de 15 min a 24 h (Dunkerley, 2008; Chin et al., 2016). O MIET tem impacto no número de eventos pluviométricos e respectivas

características, como precipitação total, intensidade média e duração (Freitas et al., 2020). No entanto, em regiões áridas e semiáridas, estudos sobre MIET são escassos e sem consenso sobre o melhor método de separação (Dunkerley, 2008; Molina-Sanchis et al., 2016; Barbosa et al., 2018).

Um critério é separar os eventos com base em durações fixas, geralmente de acordo com a resolução da aquisição dos dados. Por exemplo, o banco de dados pluviométrico mais consistente e abrangente do Brasil consiste no monitoramento diário das chuvas, iniciado no semiárido nordestino no início do século XX. Nesses casos, os eventos de chuva geralmente são separados com base em um intervalo de tempo fixo de 24 h (Figueiredo et al., 2016; Santos et al., 2017; 2018; Brasil et al., 2018). Este método pode ser inadequado, pois os intervalos de 24 horas podem conter frações de um evento ou múltiplos eventos, o que afeta a análise dos processos hidrológicos associados.

Dada a escassez de informações e a falta de concordância, o objetivo deste estudo foi determinar o melhor MIET que separa eventos de chuva estatisticamente independentes em uma região semiárida de baixa latitude, e avaliar as características dos eventos de chuva (com e sem eventos ponta única - EPU). EPU são eventos de precipitação de baixo volume e duração. Com a separação dos eventos de chuva, informações adicionais podem ser obtidas, como os efeitos das características dos eventos (intensidade, duração e frequência das chuvas) nos processos hidrológicos e erosivos, bem como nos serviços ambientais. Além disso, considerando as mudanças previstas na precipitação devido às mudanças climáticas (Dunkerley, 2008), a compreensão dos padrões de chuva e das características dos eventos é necessária para a proposição de medidas adaptativas.

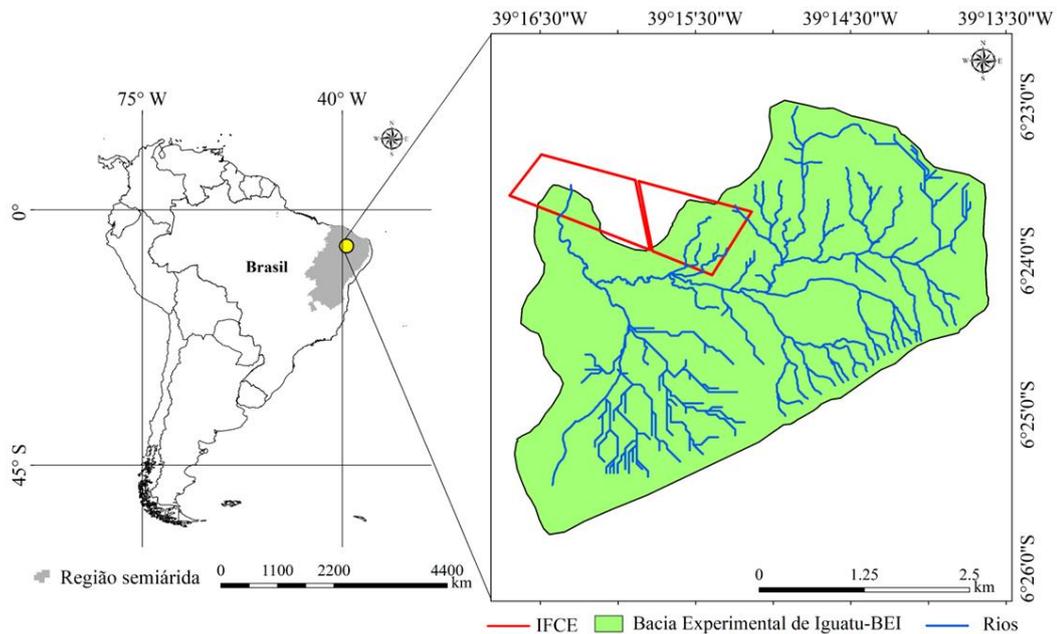
As contribuições deste estudo são úteis para entender como o MIET se relaciona com os processos ecohidrológicos, e assim, fornecer informações mais precisas sobre as características das chuvas em escala de eventos estatisticamente independentes.

## 5.2 MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

O estudo foi realizado na Bacia Experimental de Iguatu-BEI (área de 16.74 km<sup>2</sup>), na região semiárida do Nordeste do Brasil (Figura 1) entre as coordenadas geográficas (6°23'0" to 6°26'0" S and 39°13'30" to 39°16'30" W). Esta área pertence ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará-IFCE (Figura 1), e vem sendo monitorada quanto aos fluxos de água e sedimentos desde 2009.

Figura 1 - Localização da Bacia Experimental de Iguatu (BEI), Nordeste do Brasil



Fonte: Próprio autor.

O clima é BSw'h' (semiárido quente), com temperatura média de 28 °C e com estações chuvosa e seca bem definidas. Com uma precipitação média anual de 998 mm, 84% das chuvas concentram-se no período chuvoso, onde 43% dos eventos ocorrem nos meses de março e abril (Brasil et al., 2018). Os meses mais secos vão de junho a dezembro, com apenas 1% do total anual de chuvas (Brasil et al., 2018), evidenciando a alta variabilidade temporal e concentração da precipitação (Guerreiro et al., 2013; Campos et al., 2020). Apesar de se registrar uma alta precipitação anual, a evapotranspiração potencial anual é de 2113 mm, com índice de aridez de Thornthwaite de 0,48, classificando a região como semiárida, onde o déficit hídrico é observado de 9 a 10 meses por ano (Guerreiro et al., 2021).

A vegetação predominante é a Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS), também conhecida como Caatinga em regeneração. Em sua maioria, a classe de solo mais prevalente é um típico Vertissolo Ebanic carbonático com alta concentração de argila e silte (Embrapa, 2013). Para mais informações sobre as características e estudos da Bacia Experimental de Iguatu, veja os estudos realizados por (Lima et al., 2013; Santos et al., 2016, 2017, 2018; Ribeiro Filho et al., 2017; Brasil et al., 2018, 2020; Andrade et al., 2020a; Andrade et al., 2020b; Campos et al., 2020; Guerreiro et al., 2021).

### **Dados de precipitação**

A precipitação total foi monitorada de 2009 a 2020 com um registrador de dados HOBO Rain Gauge Data Logger (Measurement Systems Ltd., Newbury, Reino Unido), que é um pluviômetro de balde basculante que registra o tempo de descarga em um pequeno reservatório que corresponde a uma precipitação de 0,2 mm para cada basculada, com aquisição de dados em intervalos de 5 minutos. Embora o período de estudo não seja uma normal climatológica (30 anos), ele consiste em um valioso banco de dados de 12 anos de registros contínuos de chuva, que é muito escasso na área de estudo e em outras regiões semelhantes em todo o mundo.

Para definir e classificar os eventos de chuva, as características da chuva foram analisadas para todos os eventos de chuva e para os eventos de chuva de ponta única excluídos (EPU). EPU são eventos de precipitação de baixo volume e duração, com apenas um registro no “tipping bucket” rain gauge” ( $P \leq 0.2$  mm) (Dunkerley, 2008; Molina-Sanchis et al., 2016). Para cada uma das series de dados investigadas, as seguintes características da chuva foram avaliadas: altura (mm), duração (min), intensidade média ( $\text{mm h}^{-1}$ ), intensidade máxima em intervalos de 5, 30 e 60 min (I5, I30, I60  $\text{mm h}^{-1}$ ) e tempo entre eventos (h).

### **MIET**

Ainda nos dias atuais os hidrólogos não chegaram a um consenso sobre como definir um evento de chuva (Dunkerley, 2008; Molina-Sanchis et al., 2016; Freitas et al., 2020). Neste estudo, para definir e compreender os eventos individuais de chuva, foi adotado um tempo mínimo entre eventos (MIET), por ser um critério comumente utilizado em estudos hidrológicos para separar eventos de chuva estatisticamente independentes (Restrepo-Posada e

Eagleson, 1982; Dunkerley, 2008; Medina-Cobo et al., 2016; Molina-Sanchis et al., 2016; Chin et al., 2016; Barbosa et al., 2018; Freitas et al., 2020; Dunkerley, 2021).

O MIET é definido como um período fixo sem chuva a ser alcançado ou excedido antes e depois de cada evento de chuva (Dunkerley, 2008). Assim, duas precipitações separadas por um período sem chuva menor que um valor MIET especificado são consideradas um único evento (Restrepo-Posada e Eagleson, 1982; Nojumuddin et al., 2018; Onderka et al., 2020), que incluem os eventos de ponta única (EPU), cuja inclusão na avaliação do MIET foi objeto de análise. Os eventos pluviométricos que compõem a série histórica estudada foram agrupados de acordo com diferentes MIETs: 15 min, 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h e determinadas as características já mencionadas anteriormente, para cada evento e cada MIET.

Para definir o MIET que melhor representasse as características das chuvas da área de estudo com ou sem EPU, cinco funções de distribuição de probabilidade foram ajustadas (Tabela 1) para os eventos de chuva definidos em cada MIET. As equações foram definidas de acordo com a metodologia proposta por (Wilks, 1995; Yuan et al., 2018; Lima et al., 2021).

Tabela 1 - Descrição das funções de distribuição de probabilidade ajustadas aos dados de chuva

Distribuição	funções de distribuição de probabilidade
Normal	$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx$
Log-Normal	$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{x\sigma\log(x)\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\log(x) - \mu\log(x)}{\sigma\log(x)}\right]^2\right\} dx$
Gamma	$F(x) = \frac{1}{\beta^\alpha\Gamma(\alpha)} \int_0^x \mu^{\alpha-1} e^{-\mu} dx \text{ for } 0 < x < \infty$
Exponential	$F(x) = \int_0^x f(x) dx = 1 - e^{-\lambda x}$
Weibull	$F(x) = \int_0^x f(x) dx = 1 - e^{-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^\gamma}$

Fonte: Próprio autor.

$\mu$  é a média e  $\sigma$  é o desvio padrão da variável aleatória;  $x$  é a variável aleatória,  $f(x)$  é a probabilidade da variável ser menor ou igual  $x$ ,  $\mu$  é o valor logarítmico médio da variável  $x$ , e  $\sigma$  é o desvio padrão do log da variável  $x$ ;  $\Gamma(\alpha)$  função gama para o parâmetro  $\alpha$ , ( $> 0$ ) é o parâmetro de forma para a variável aleatória  $x$ , e  $\beta$  ( $> 0$ ) é o parâmetro de escala para a variável aleatória  $x$ ;  $\lambda$  é o inverso da média;  $\alpha$  é a forma,  $\beta$  é a escala e  $\gamma$  é o parâmetro de localização.

As distribuições (Normal, Log-Normal, Gama, exponencial e Weibull) foram empregadas neste estudo porque fornecem ajustes satisfatórios na análise de eventos hidrológicos e climáticos (Wilks, 1995; Esteves, 2013; Yuan et al., 2018; Lima et al., 2021; Moccia et al., 2021). A adequação das funções de distribuição de probabilidade foi avaliada por meio do teste

de aderência Anderson-Darling (AD) com níveis de significância variando entre 95% e 99% (Esteves, 2013; Beskow et al., 2015; Lima et al., 2021). Em geral, quanto melhor a distribuição se ajusta aos dados de chuva, menor a estatística de AD (Nojumuddin et al., 2018). O teste de AD foi adotado por ser uma alternativa ao teste Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e muito semelhante ao teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S), pois dá maior peso às caudas das distribuições em relação aos demais testes (Wilks, 1995; Beskow et al., 2015; Lima et al. 2021).

### **Análises estatísticas**

Análises estatísticas descritivas e gráficos boxplots foram usados para avaliar a distribuição das características das chuvas com ou sem eventos de ponta única (EPU) para os diferentes tempos mínimos entre os eventos (MIET) analisados. A normalidade dos dados foi analisada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Como não houve aderência pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, adotou-se o teste não paramétrico da soma dos postos de Wilcoxon para comparar se as medianas dos eventos com ou sem EPU correspondem à mesma distribuição com um nível de confiança de 99%.

Uma vez determinado o MIET mais adequado, os eventos de chuva para este MIET foram divididos em grupos usando a técnica de Análise Multivariada/Análise de Agrupamento Hierárquico (HGA), com base na altura da chuva (mm), duração da chuva (horas) e intensidade média da chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ ). O algoritmo de agrupamento usado foi o método de Ward e as distâncias euclidianas quadradas para definir regiões com eventos de chuvas semelhantes. Para reduzir os erros devido à escala e unidades das variáveis, os dados foram padronizados (adimensionais) pelo método do z-score. As características distintivas de cada grupo foram examinadas pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis com um nível de confiança de 95%.

Todas as análises estatísticas foram realizadas com os seguintes softwares: Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versão 16.0, MINITAB versão 18, Matlab versão R2015a e Microsoft Excel.

### **5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **Eventos de chuva com e sem eventos de ponta única (EPU)**

As características médias das chuvas (altura, duração, intensidade média, e intensidade máxima em intervalos de 5, 30 e 60 min mudaram de acordo com o tempo mínimo entre eventos (MIET) e com a inclusão ou exclusão dos eventos de ponta única - EPU (Tabela 2-3; Figura 2). A dinâmica dos eventos pluviométricos indica que atenção redobrada deve ser dada aos estudos que adotam a análise dos dados com base na escala dos eventos (Dunkerley, 2008; Molina-Sanchis et al., 2016; Barbosa et al., 2018; Freitas et al., 2020; Andrade et al., 2020b), considerando que essas características influenciam na avaliação da interceptação (Medeiros et al., 2009; Zhang et al., 2015, 2016; Brasil et al., 2018, 2020; Návar, 2020), infiltração de água no solo (Figueiredo et al., 2016), escoamento superficial (Pathak et al., 2013; Santos et al., 2016; 2017), perda de solo (Medeiros; Araújo, 2014; Ribeiro Filho et al., 2017; Santos et al., 2018), energia cinética (Lima et al., 2013), teor de umidade do solo (Costa et al., 2013; 2016; Rascón-Ramos et al., 2021) e serviços ecossistêmicos (Andrade et al., 2020a; Guerreiro et al., 2021).

Tabela 2 - Estatísticas descritivas das características dos eventos de chuva com e sem eventos de ponta única (EPU) para tempos mínimos entre eventos (MIETs) variando de 15 min a 24 h

		Todos os eventos de chuva							Eventos de chuva de ponta única excluídos (EPU)						
	MIET	Mean	SD	CV	Kur	Ske	Min	Max	Mean	SD	CV	Kur	Ske	Min	Max
<b>P</b>	15	5.09	10.72	210.45	27.82	4.26	0.20	142.04	8.49	12.97	152.71	17.66	3.34	0.40	142.04
	1	9.83	15.21	154.73	11.04	2.78	0.20	142.04	12.73	16.29	127.92	8.94	2.47	0.40	142.04
	2	11.91	16.82	141.19	11.55	2.68	0.20	161.97	14.48	17.57	121.35	10.29	2.50	0.40	161.97
	3	13.45	17.58	130.69	10.02	2.48	0.20	161.97	15.49	18.05	116.55	9.35	2.37	0.40	161.97
	6	16.32	18.79	115.14	8.30	2.25	0.20	161.97	17.42	18.93	108.71	8.14	2.21	0.40	161.97
	12	19.52	20.78	106.45	6.32	2.04	0.20	161.97	20.01	20.82	104.04	6.29	2.03	0.40	161.97
	24	28.17	30.85	109.51	8.47	2.43	0.60	212.00	28.35	30.88	108.92	8.46	2.43	0.60	212.00
<b>D</b>	15	0.45	0.75	164.58	36.36	4.62	0.08	10.92	0.72	0.89	123.94	25.74	3.86	0.08	10.92
	1	1.28	1.66	129.59	8.44	2.45	0.08	13.00	1.64	1.74	105.75	7.18	2.24	0.08	13.00
	2	1.84	2.16	117.42	4.97	1.97	0.08	13.92	2.23	2.21	99.07	4.39	1.84	0.08	13.92
	3	2.38	2.59	108.86	6.40	1.98	0.08	20.92	2.74	2.61	95.42	6.30	1.94	0.08	20.92
	6	3.81	4.01	105.45	5.29	1.96	0.08	25.58	4.06	4.02	99.10	5.19	1.95	0.08	25.58
	12	6.17	7.93	128.45	13.52	2.95	0.08	71.08	6.33	7.97	125.93	13.37	2.94	0.08	71.08
	24	16.44	20.86	126.88	4.50	1.96	0.08	123.68	16.55	20.88	126.21	4.47	1.96	0.08	123.68
<b>I</b>	15	8.35	9.89	118.34	12.06	2.90	1.33	103.46	11.86	11.49	96.89	7.57	2.22	1.33	103.46
	1	8.36	10.11	121.00	17.31	3.38	0.38	103.46	9.94	11.02	110.85	13.94	3.01	0.38	103.46
	2	8.11	10.13	124.89	19.09	3.54	0.35	103.46	9.22	10.83	117.47	16.21	3.25	0.35	103.46
	3	7.80	9.19	117.71	11.09	2.80	0.15	76.32	8.51	9.63	113.14	9.65	2.61	0.15	76.32
	6	7.35	9.11	124.03	13.05	3.05	0.08	76.32	7.59	9.33	122.81	12.33	2.96	0.08	76.32
	12	7.40	9.59	129.64	12.33	3.00	0.11	76.32	7.45	9.66	129.64	12.17	2.99	0.11	76.32
	24	6.32	9.87	156.16	14.53	3.35	0.06	76.32	6.25	9.86	157.81	14.77	3.39	0.06	76.32
<b>I5</b>	15	16.04	23.54	146.74	5.47	2.32	2.40	142.46	24.98	27.35	109.47	2.19	1.58	2.40	142.46
	1	25.63	28.75	112.16	1.67	1.46	2.40	142.46	32.46	29.60	91.19	0.90	1.18	2.40	142.46
	2	29.39	29.92	101.80	1.03	1.25	2.40	142.46	35.19	30.08	85.49	0.64	1.07	2.40	142.46
	3	32.09	30.37	94.66	0.76	1.14	2.40	142.46	36.55	30.26	82.79	0.55	1.02	2.40	142.46
	6	37.28	30.75	82.50	0.39	0.96	2.40	142.46	39.58	30.45	76.95	0.35	0.92	2.40	142.46
	12	41.67	30.68	73.62	0.25	0.87	2.40	142.46	42.60	30.49	71.57	0.25	0.87	2.40	142.46
	24	48.56	31.53	64.93	-0.15	0.66	2.40	142.46	48.77	31.53	64.65	-0.15	0.66	2.40	142.46
<b>I30</b>	15	21.50	18.35	85.36	1.97	1.40	2.40	100.67	21.50	18.35	85.36	1.97	1.40	2.40	100.67
	1	22.06	18.38	83.29	1.91	1.38	2.40	100.67	22.06	18.38	83.29	1.91	1.38	2.40	100.67
	2	22.61	18.50	81.79	1.82	1.36	2.40	100.67	22.61	18.50	81.79	1.82	1.36	2.40	100.67
	3	22.84	18.63	81.59	1.70	1.33	2.40	100.67	22.84	18.63	81.59	1.70	1.33	2.40	100.67
	6	23.47	18.68	79.58	1.62	1.30	2.40	100.67	23.47	18.68	79.58	1.62	1.30	2.40	100.67
	12	24.36	19.01	78.04	1.42	1.25	2.40	100.67	24.36	19.01	78.04	1.42	1.25	2.40	100.67
	24	27.58	19.89	72.13	0.91	1.08	2.40	100.67	27.58	19.89	72.13	0.91	1.08	2.40	100.67
<b>I60</b>	15	18.88	14.49	76.77	2.64	1.46	1.52	81.60	18.88	14.49	76.77	2.64	1.46	1.52	81.60
	1	19.23	13.75	71.51	2.70	1.39	2.40	81.60	19.23	13.75	71.51	2.70	1.39	2.40	81.60
	2	18.92	13.74	72.64	2.64	1.39	2.40	81.60	18.92	13.74	72.64	2.64	1.39	2.40	81.60
	3	18.99	13.79	72.61	2.55	1.38	2.40	81.60	18.99	13.79	72.61	2.55	1.38	2.40	81.60
	6	19.00	13.60	71.58	2.72	1.41	2.40	81.60	19.00	13.60	71.58	2.72	1.41	2.40	81.60
	12	19.42	13.60	70.06	2.69	1.40	2.40	81.60	19.42	13.60	70.06	2.69	1.40	2.40	81.60
	24	21.53	13.81	64.14	2.49	1.33	2.40	81.60	21.53	13.81	64.14	2.49	1.33	2.40	81.60

Fonte: Próprio autor.

P – Altura da chuva (mm); D - Duração da chuva (h); I - Intensidade média da chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ ); Intensidade máxima em intervalos de 5, 30 e 60 min (I5 a I60,  $\text{mm h}^{-1}$ ); Mean – Média; SD – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação (%); Kur – Curtose; Ske – Assimetria; Min – Mínimo; Max – Máximo.

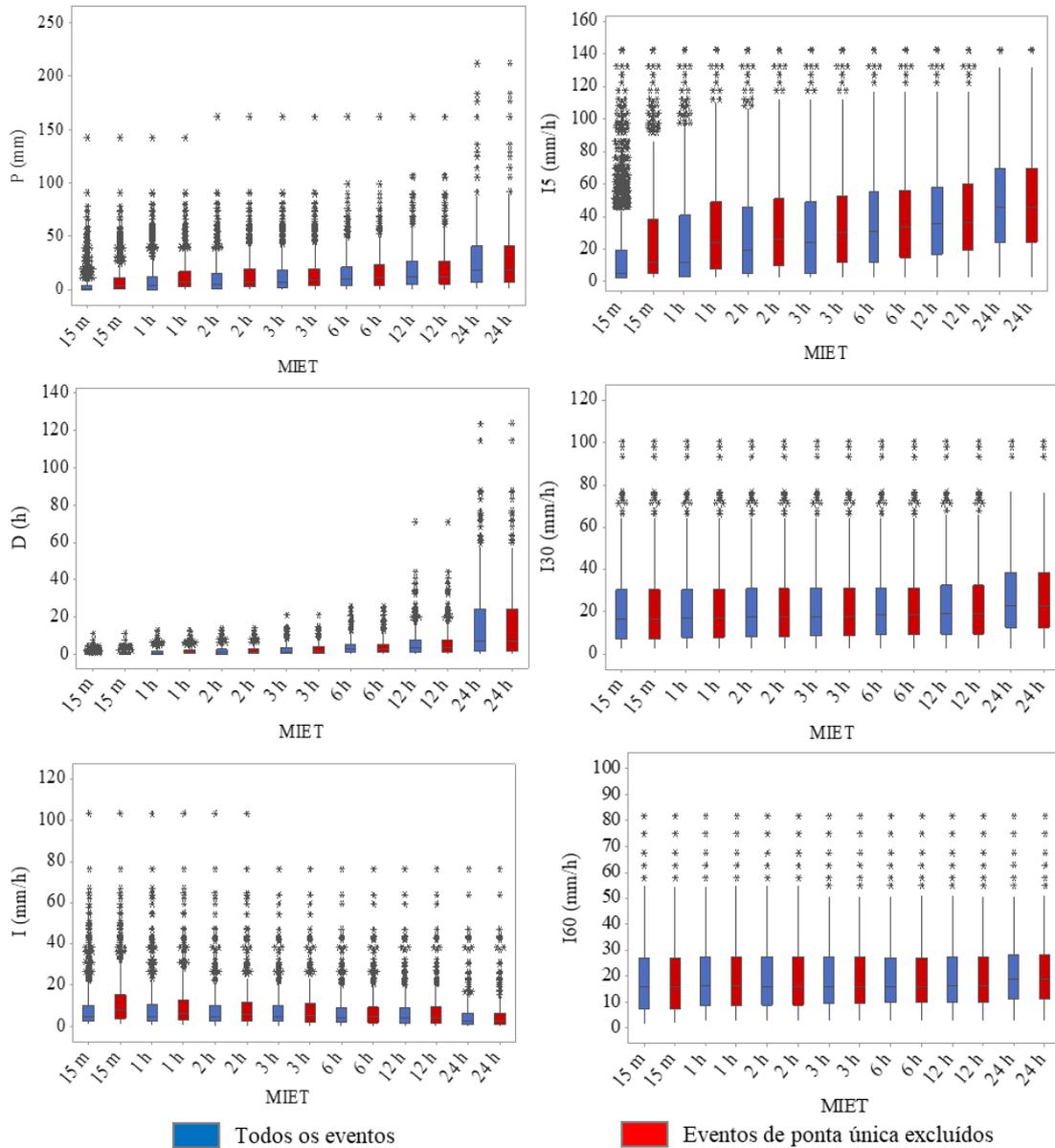
Tabela 3 - Características dos eventos de chuva em função do tempo mínimo entre eventos (MIETs, de 15 min a 24 h)

<b>Todos os eventos de chuva</b>											
MIET	P		D		I		I5		I30	I60	Nº de eventos
15 min	<b>0.76</b>	<b>b</b>	<b>0.17</b>	<b>b</b>	<b>4.8</b>	<b>b</b>	<b>5.09</b>	<b>b</b>	16.51	15.75	1698
1 h	<b>3.4</b>	<b>b</b>	<b>0.67</b>	<b>b</b>	<b>4.8</b>	<b>b</b>	<b>12.19</b>	<b>b</b>	16.8	16.11	880
2 h	<b>5.2</b>	<b>b</b>	<b>1.13</b>	<b>b</b>	4.61		<b>19.2</b>	<b>b</b>	17.79	15.8	726
3 h	6.8		<b>1.5</b>	<b>b</b>	4.58		<b>24</b>	<b>b</b>	17.81	15.8	643
6 h	9.75		2.75		4.08		30.53		18.4	15.8	530
12 h	12.3		3.58		4.05		36		19.5	16.28	443
24 h	18.2		7.08		2.46		45.6		23.1	18.62	307
<b>Eventos de chuva de ponta única excluídos (EPU)</b>											
MIET	P		D		I		I5		I30	I60	Nº de eventos
15 min	<b>3.2</b>	<b>a</b>	<b>0.42</b>	<b>a</b>	<b>8</b>	<b>a</b>	<b>12.19</b>	<b>a</b>	16.51	15.75	995
1 h	<b>6.4</b>	<b>a</b>	<b>1.08</b>	<b>a</b>	<b>6.38</b>	<b>a</b>	<b>24</b>	<b>a</b>	16.8	16.11	675
2 h	<b>7.62</b>	<b>a</b>	<b>1.5</b>	<b>a</b>	5.95		<b>26.4</b>	<b>a</b>	17.79	15.8	595
3 h	8.8		<b>1.92</b>	<b>a</b>	5.38		<b>30.48</b>	<b>a</b>	17.81	15.8	557
6 h	10.86		2.96		4.62		33.6		18.4	15.8	496
12 h	12.42		3.75		4.12		36.58		19.5	16.28	432
24 h	18.23		7.17		2.45		45.72		23.1	18.62	305

Fonte: Próprio autor.

P – Altura da chuva (mm); D - Duração da chuva (h); I - Intensidade média da chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ ); Intensidade máxima em intervalos de 5, 30 e 60 min (I5 a I60,  $\text{mm h}^{-1}$ ); medianas estatisticamente diferentes ao nível de 1% pelo teste de Wilcoxon com a inclusão ou exclusão dos EPU são indicadas em negrito

Figura 2 - Distribuição da precipitação total (P), duração da chuva (D), intensidade média (I) e intensidades máximas (I5, I30 e I60) para eventos de chuva com e sem eventos de ponta única (EPU), em função dos tempos mínimos entre eventos (MIETs, de 15 min a 24 h

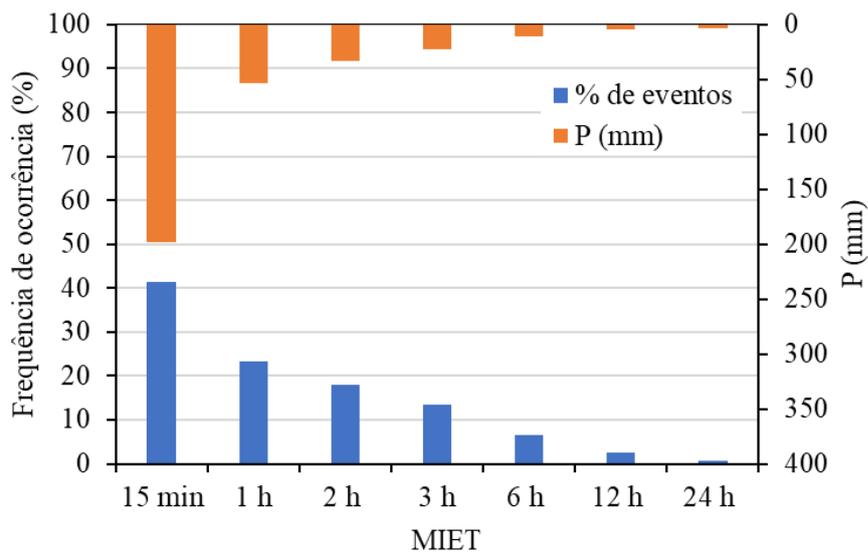


Fonte: Próprio autor.

Podemos perceber na figura 3 que o impacto dos eventos de ponta única - EPU na caracterização da chuva depende do MIET definido para a análise. A análise da frequência de ocorrência dos EPUs pelo MIET identifica 41% dos eventos de chuva quando o MIET é de 15 min, correspondente a 199 mm (2.3% da precipitação total e diminui para dois eventos de EPU de 307 eventos totais para um MIET de 24 h (0,03% da precipitação total) (Figura 3). O aumento do MIET para separação de eventos implica uma diminuição no número de EPU e,

consequentemente, da precipitação associada a eventos de ponta única (Molina-Sanchis et al., 2016). O teste não paramétrico de Wilcoxon indicou diferença significativa nas variáveis estudadas para MIET igual ou inferior a 3 horas (Tabela 3), pois as medianas dos eventos com ou sem EPU não correspondem à mesma distribuição com um nível de confiança de 99%. A precipitação total esperada por EPU assumindo um MIET de 6 horas quando não há mais diferença estatística é de 10.7 mm para todo o período de estudo (2009 a 2020). Portanto, esses resultados sugerem que o melhor MIET para caracterizar eventos de chuva estatisticamente independentes na região de estudo, deve ser igual ou superior a 6 h, visto que os EPUs não mais interferem na escolha do MIET (Tabela 3), com um nível de confiança de 99%.

Figura 3 - Frequência de ocorrência dos eventos de ponta única (%) e distribuição da altura total da chuva em função do tempo mínimo entre eventos (MIET de 15 min a 24 h)

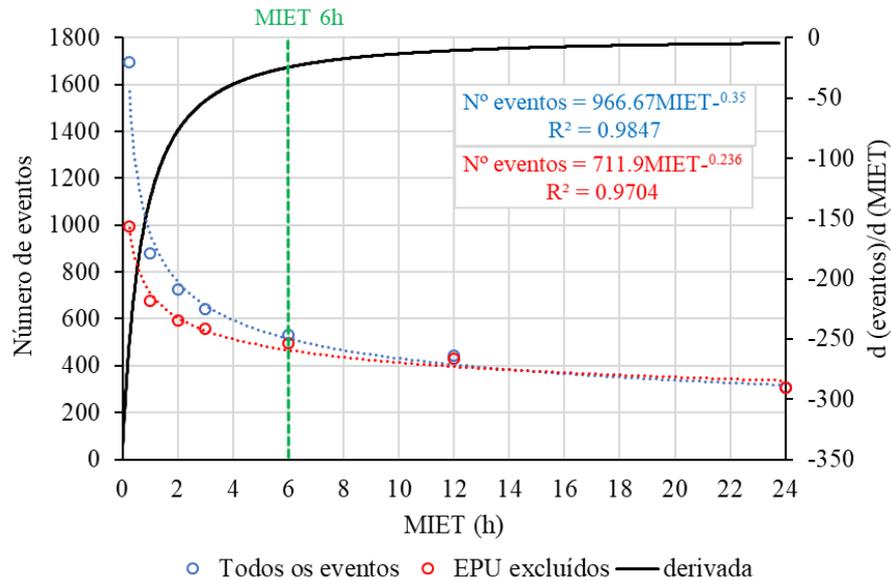


Fonte: Próprio autor.

Uma curva de potência se ajusta melhor à relação entre o número de eventos e MIET com e sem EPU (Figura 4). Ambos expressaram altas correlações, com  $R^2$  de 0,98 e 0,97 para eventos com e sem EPU, respectivamente (Figura 4). Pelo modelo de melhor ajuste, quanto menor o MIET adotado, mais eventos de chuva são separados em eventos de chuva individuais e mais eventos de chuva são combinados como evento único conforme a resolução temporal do MIET aumenta (Dunkerley, 2008; Medina-Cobo et al., 2016; Molina-Sanchis et al., 2016; Chin et al., 2016). Os resultados apontam para uma queda considerável no número total de eventos de chuva para valores de MIET superiores a 6 h (Figura 4) em ambas as condições testadas. Os

MIETs com menos de 6 horas representam aproximadamente 96% do total de eventos de precipitação, caracterizando a ocorrência de um elevado número de EPU (Figura 3). A derivada do número de eventos por MIET diminui significativamente com o aumento do MIET (Figura 4), com diminuição de cem vezes no valor entre 6 e 9 h. Para MIETs maiores que 6 h, as duas curvas do número de eventos com e sem EPU são semelhantes (Figura 4) e a derivada encontra-se em um padrão de lentidão decrescente.

Figura 4 - Relação entre o tempo mínimo entre eventos (MIETs, de 15 min a 24 h) e o número de eventos de chuva. A linha tracejada verde indica MIET de 6 h, quando não há mais diferença estatística entre a análise com e sem eventos de ponta única (EPU)



Fonte: Próprio autor.

Estudos realizados em ambientes áridos e semiáridos não utilizaram os EPU para avaliar as características médias das chuvas, pois consideraram esses dados incertos (Dunkerley, 2008; Molina-Sanchis et al., 2016; Dunkerley, 2020). No entanto, entendemos que os EPU devem ser investigados em estudos de caracterização das chuvas, por isso os EPU foram incluídos na avaliação do MIET como objeto de análise neste estudo. EPU podem ser crucial para estudos em florestas tropicais secas com foco, por exemplo, na interceptação do dossel (Medeiros et al., 2009; Brasil et al., 2020), dinâmica da umidade do solo (Costa et al., 2016), rachaduras no solo e geração de escoamento – particularmente em vertissolos (Santos et al., 2016) – bem como fluxos de água na interface solo-atmosfera (Pinheiro et al., 2016) e processos ecológicos, como encolhimento e expansão das raízes (Pinheiro et al., 2013). Portanto, é importante que os EPU

sejam investigados em estudos de caracterização da chuva para melhor definir o MIET em regiões semiáridas com alta variabilidade temporal (Medeiros e Araújo, 2014; Campos et al., 2020) e espacial (Guerreiro et al., 2013; Marengo et al., 2017; Freitas et al., 2020).

### **Características de todos os eventos de chuva**

As estatísticas descritivas dos eventos com ou sem EPU são apresentadas na (Tabela 2) e a variabilidade das características médias das chuvas em função de cada MIET na (Figura 2). Para todos os eventos de chuva, a altura média da chuva variou de 5.1 a 28.2 mm para os MIETs de 15 min e 24 h respectivamente (Tabela 2), que é uma diferença de cinco vezes o MIET de 15 min. A duração média dos eventos de chuva variou de 0,45 h (MIET = 15 min) a 16,4 h (MIET = 24 h), ou seja, um aumento de mais de 36 vezes (Tabela 2). Os maiores coeficientes de variação foram registrados no MIET de 15 min.

A duração da chuva tende a aumentar à medida que o valor do MIET aumenta, com os maiores valores no MIET acima de 6 h (Figura 2). A maior variação para a duração da chuva ocorre para um tempo de separação de chuva maior de aproximadamente um dia (Medina-Cobo et al., 2016). No entanto, a intensidade média das chuvas é reduzida em 24,3% a um MIET de 24 h (Tabela 2; Figura 2). Os valores médios de intensidade e CV permanecem quase constantes, independentemente do valor de MIET, como também demonstrado por (Medina-Cobo et al., 2016).

Em geral, os eventos de chuva têm maior duração, maior precipitação total e menor intensidade média para MIETs mais altos (Tabela 2; Figura 2), devido ao maior número de registros contínuos incorporados aos eventos (Nojumuddin et al., 2018). Para MIETs mais altos, a intensidade média dos eventos de chuva mostra maior variabilidade intra-evento (Tabela 2) porque intervalos de tempo cada vez maiores são incluídos nos eventos (Dunkerley, 2008).

Para as intensidades máximas de chuva em diferentes intervalos de tempo (I5 a I60), a intensidade máxima em 5 min (I5 max) foi a mais variável (maiores valores de CV, assimetria e curtose), como também mostrado por (Molina-Sanchis et al., 2016), e com amplitudes maiores, como observado no estudo de Brasil et al. (2020). À medida que o intervalo de tempo aumenta, as intensidades máximas diminuem, com menor variabilidade para diferentes MIETs, indicando uma atenuação da intensidade da chuva em intervalos maiores e menor variação no CV (Tabela 2; Figura 2).

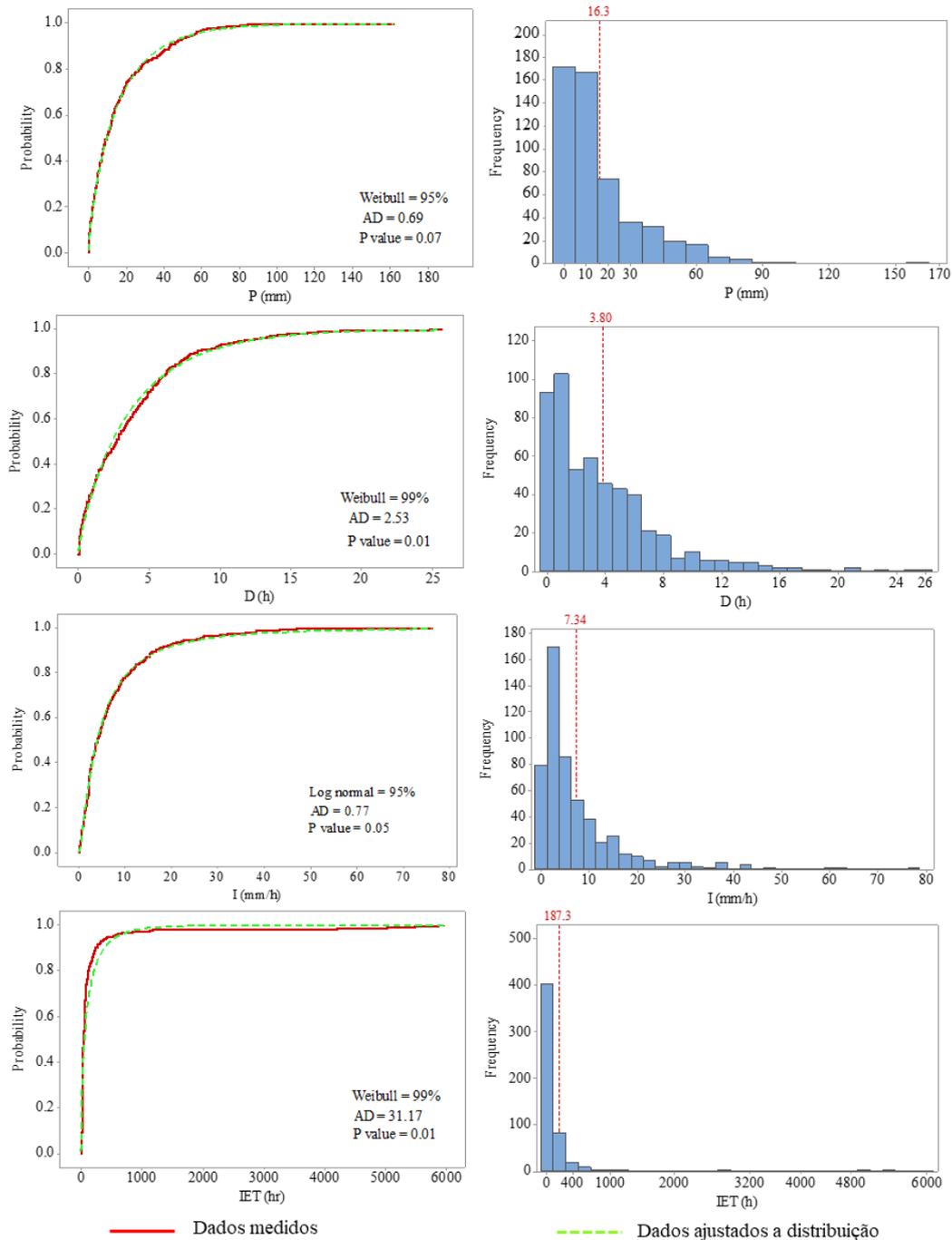
Em todas as variáveis analisadas (Tabela 2), os valores mais altos e mais positivos do coeficiente de curtose e assimetria registrados nos MIETs mais baixos indicam uma maior concentração de valores intermediários. Essas características definem um maior coeficiente de variação dos dados e uma distribuição não normal, uma vez que os valores não se aproximam de zero, indicando que os dados não estão distribuídos igualmente em torno da média (Lima et al., 2021). Para MIETs mais longos, por exemplo 24 h, as características dos eventos de chuva apresentam maior variabilidade intra-evento (Dunkerley, 2008) e, com isso, uma análise dos processos ecohidrológicos pode diferir. Por exemplo, em estudos de erosão do solo que usam a intensidade média de chuva para representar a capacidade da chuva de causar erosão por meio de relações empíricas (Wischmeier and Smith, 1978; Lima et al., 2013; Medeiros; Araújo, 2014; Ribeiro Filho et al., 2017; Santos et al., 2017, 2018) e obter o índice de erosividade, atenção cuidadosa é essencial e deve ser tomada em conta que os resultados gerados para cada MIET são diferentes.

### **Tempo mínimo entre eventos (MIET)**

A análise de distribuição de frequência de probabilidade foi ajustada para todos os eventos de altura de chuva, duração, intensidade média e IET em cada MIET investigado (Apêndice Tabela A1). Em todas as distribuições de probabilidade analisadas (Apêndice Tabela A1), constatou-se que quanto menor o MIET adotado, mais distantes os dados estão do intervalo de confiança de 95% da distribuição de frequência. Isso se deve ao fato de que os EPUs ocorrem com maior frequência até um MIET de 3 h (Figura 3; Tabela 3) (Molina-Sanchis et al., 2016). À medida que o MIET aumenta de 6 para 24 h, os EPU diminuem, apresentando um menor coeficiente de variação (Tabela 2). Ambas as séries apresentam padrão de distribuição semelhante (Figura 4) com valores medianos estatisticamente iguais (Tabela 3), os quais foram detectados pelo teste não paramétrico de Wilcoxon com nível de confiança de 99%.

Entre as distribuições testadas (Normal, Log-Normal, Gamma, Exponencial e Weibull), a distribuição Weibull foi a que melhor se ajustou aos dados de precipitação total, duração e IET, e a distribuição Log-Normal sobre a intensidade média de chuva (Figura 5), como também demonstrado em estudos recentes (Esteves, 2013; Lima et al. 2021).

Figura 5 - Distribuição de frequência da precipitação total, duração, intensidade média e tempo entre eventos (IET) para tempo mínimo entre eventos (MIET) de 6 h



Fonte: Próprio autor.

De acordo com o teste de adequação de Anderson-Darling (AD), o MIT de 6 h (Apêndice Tabela A1; Figura 5), foi o que apresentou a melhor aderência ( $AD = 0.69$  e  $p = 0.07$ ) para a altura da chuva, implicando que um MIET de 6 h é o mais adequado para caracterizar a distribuição das chuvas na região de estudo. Para as demais variáveis analisadas usando MIT

de 6h, as curvas apresentaram boa adequação pelo teste AD, com níveis de significância variando entre 95% e 99% (Apêndice Tabela A1; Figura 5). Uma melhor adequação dos eventos hidrológicos e climáticos à distribuição de Weibull foi verificada por estudos recentes (Esteves, 2013; Yuan et al. 2018; Moccia et al. 2021; Lima et al. 2021).

Pesquisas em diferentes partes do globo destacam que um MIET de 6 horas é amplamente adotado em estudos hidrológicos (Wischmeier e Smith, 1978; Link et al., 2004; Murakami, 2006; Dunkerley, 2008; Dunkerley, 2021). Assim como neste estudo, a alteração do valor MIET altera substancialmente o número e as propriedades dos eventos de chuva em uma região árida da Austrália (Dunkerley, 2008). No entanto, ainda não há um consenso sobre o melhor MIET para caracterizar eventos de chuva em ambientes áridos e semiáridos, e critérios hidrológicos têm sido utilizados. Na região semiárida da Espanha, estudos mostram que o MIET ótimo é 1 hora, pois é o período mínimo necessário para a água em macroporos maiores drenar e modificar suficientemente o efeito da umidade do solo no processo de geração de escoamento (Molina-Sanchis et al., 2016). Para a região semiárida do Nordeste do Brasil, estudos indicam que o MIET de 30 min é o mais representativo para caracterizar as principais propriedades da chuva por tipo de hietograma (Barbosa et al., 2018).

Devido a esta diversidade de critérios, o MIET deve ser definido levando em consideração os objetivos da pesquisa e as características específicas do local de estudo. Com base nos resultados do presente estudo, esperamos que novos estudos possam ser desenvolvidos em ambientes áridos e semiáridos, a fim de compreender como o MIET de 6 h se relaciona com outros processos ecohidrológicos e, assim, fornecer informações mais precisas sobre as características das chuvas em escala de eventos estatisticamente independentes.

Em termos de intervalos secos entre eventos de chuva (IET), ele aumenta à medida que o MIET é alterado. Para o MIET de 6 h, o IET médio foi 187.3 h (49.2 vezes maior do que a duração média do evento). Em todos os casos, o maior intervalo entre os eventos foi um intervalo sem chuva de 248 dias (5944.6 h Figura 5). Este longo período de dias secos contínuos é esperado para esse local, com mais de 80% das chuvas concentrando-se no período chuvoso (janeiro-abril) e os meses de seca se estendem-se de junho a dezembro, com apenas 1% do total anual de chuvas (Brasil et al., 2018), mostrando a alta variabilidade temporal da precipitação (Guerreiro et al., 2013; Campos et al., 2020).

### **Caracterização de chuva por um tempo mínimo entre eventos de 6 h (MIET)**

Após identificar o MIET de 6 h como o mais adequado para caracterizar a distribuição das chuvas na região, os eventos foram agrupados com base na precipitação total (mm), duração (horas) e intensidade média ( $\text{mm h}^{-1}$ ), resultando em três classes estatisticamente diferentes (Tabela 4; Figura 6). A classe de chuva representada pelo grupo I foi composta pelos eventos com menor altura pluviométrica, durações intermediárias e menor intensidade média de chuva (Tabela 4, Figura 6). Esta classe é caracterizada pela alta frequência de pequenos eventos (88,7% dos eventos registraram precipitação  $< 20$  mm) e baixa intensidade média (Tabela 4). Essa classe representa 77,4% do total de eventos, sendo responsável por 42,4% do total precipitado. A alta ocorrência de pequenos eventos e alta variabilidade temporal é uma característica comum dos eventos pluviométricos nesta região tropical semiárida (Santos et al., 2017; Brasil et al., 2018). Para mais informações sobre a contribuição de eventos de baixa magnitude para a compreensão dos processos hidrológicos, consulte as pesquisas de Andrade et al. (2020b); Brasil et al. (2018, 2020).

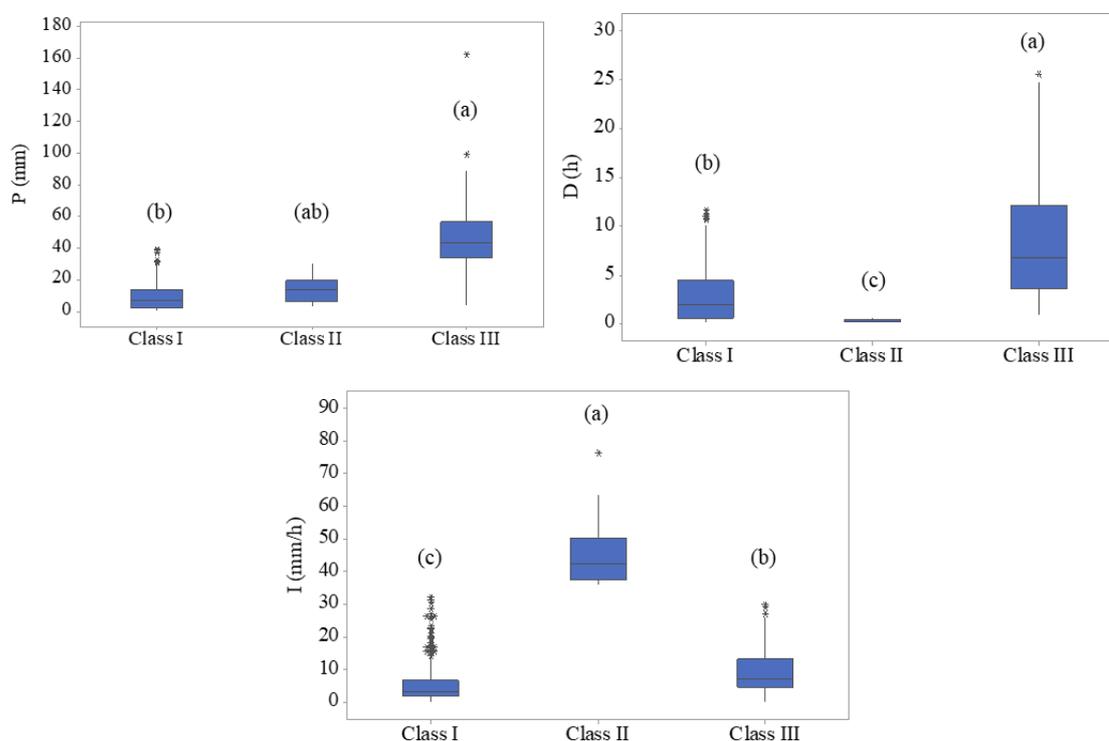
Tabela 4 - Características dos eventos de chuva com base no tempo mínimo entre eventos de 6 horas

Classes de chuva	Variáveis	Média	Desvio Padrão	CV	Nº de eventos
Classe I	P (mm)	8.94	8.04	0.90	410
	D (h)	2.82	2.61	0.93	
	I ( $\text{mm h}^{-1}$ )	5.59	6.05	1.08	
Classe II	P (mm)	14.18	8.42	0.59	14
	D (h)	0.32	0.19	0.59	
	I ( $\text{mm h}^{-1}$ )	45.88	12.12	0.26	
Classe III	P (mm)	45.12	21.62	0.48	106
	D (h)	8.10	5.53	0.68	
	I ( $\text{mm h}^{-1}$ )	9.06	6.70	0.74	

Fonte: Próprio autor.

P – Altura da chuva (mm); D - Duração da chuva (h); I - Intensidade média da chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ ); CV – Coeficiente de variação

Figura 6 - Distribuição da precipitação total, duração e intensidade média com base em um tempo mínimo entre eventos de 6 h



Fonte: Próprio autor.

\* representam os outliers, e letras diferentes (a, b e c) representam uma diferença estatística significativa dos valores medianos pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis com nível de confiança de 95%

A classe II foi formada por 14 eventos, mas registrou as menores durações (mediana de 0.32 h) (Tabela 4) e as maiores intensidades de chuva (média  $45.8 \text{ mm h}^{-1}$ ) (Tabela 4). Esses resultados são atribuídos às chuvas convectivas, com alta intensidade e curta duração (Lima et al., 2013 ; Santos et al., 2017) que são comuns em regiões semiáridas. Para a região do semiárido tropical de estudo, eventos de chuva de curta duração com alta intensidade desempenham um papel importante nos processos hidrológicos (Medeiros and Araújo, 2014; Santos et al., 2017; Andrade et al., 2020b), particularmente na geração de escoamento do tipo Hortoniano (Figueiredo et al., 2016) e no início da estação chuvosa onde predominam os vertissolos (Santos et al., 2016).

A classe III apresenta os eventos com as maiores alturas pluviométricas, com máxima de 161,9 mm, média de 45,1 mm e mediana de 43,2 mm (Tabela 4, Figura 6). Eventos de chuva mais longos (aproximadamente 1 dia) com média de 8,1 h (Tabela 4, Figura 6) também foram observados para esta classe. Essas maiores alturas pluviométricas durante o período chuvoso devem-se aos sistemas atmosféricos operando na região de estudo, onde a distribuição da precipitação está relacionada principalmente ao deslocamento da Zona de Convergência

Intertropical (ZCIT) para o sul durante os meses de fevereiro a maio (Guerreiro et al., 2013) e sistemas de chuvas frontais (Ferreira and Mello, 2005). Para a área de estudo, eventos de chuvas de alta magnitude são hidrológicamente importantes para que o dossel da vegetação exceda sua capacidade de interceptação e sature, gerando uma redistribuição das chuvas para o solo, favorecendo a infiltração, aumentando a umidade do solo e contribuindo para outros processos ecohidrológicos (Brasil et al., 2018, 2020; Andrade et al., 2020a).

Ressaltamos a importância deste estudo, pois trabalhos anteriores na região classificaram os eventos de chuva de forma diferente (Brasil et al., 2018; Santos et al., 2017) e foram apoiados por registros diários de precipitação (precipitação total em intervalos de 24 h) para sua caracterização. O presente trabalho verificou diferenças significativas nas características dos eventos com base nos valores do MIET e, portanto, a importância de definir adequadamente o MIET para separação de eventos para a avaliação de processos hidrológicos com base em eventos de chuva é fundamental.

#### **5.4 CONCLUSÕES**

Doze anos consecutivos de dados de precipitação em intervalo de 5 minutos foram coletados e agrupados em diferentes tempos mínimos entre eventos (MIETs) na Bacia Experimental de Iguatu, na região semiárida tropical do Nordeste do Brasil. A inclusão ou exclusão de eventos de ponta única (EPU) na escolha do MIET mais adequado afetou o número de eventos de chuva e respectivas características; o número de eventos de ponta única diminuiu até um MIET de 3 h, mas não mostrou diferença acima de um MIET de 6h. Nenhuma das variáveis investigadas mostra diferença significativa ao incluir ou não incluir EPUs para MIETs a partir de 6 h. O MIET de 6 h é o mais adequado para caracterizar a distribuição das chuvas, sendo a distribuição Weibull a mais adequada para representar a precipitação total do evento, duração e tempo entre eventos nesta região tropical semiárida do Brasil.

Nosso estudo traz descobertas sobre a definição de eventos de chuva com base no critério de tempo mínimo entre eventos (MIET), particularmente para ambientes semiáridos onde os registros contínuos de chuva de longo prazo são geralmente escassos. Ao fornecer informações sobre as características das chuvas em uma escala de eventos estatisticamente independente para MIET de 6 h, este estudo contribui para a compreensão dos processos ecohidrológicos e fornece meios para melhorar as simulações hidrológicas e sedimentológicas que têm as intensidades de chuva como um dos principais impulsionadores.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e à Fundação Estadual de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) do Ceará pelo seu apoio financeiro para esta pesquisa.

## Apêndice

Tabela A1 - Funções de distribuição de probabilidade ajustadas aos dados de chuva para diferentes tempos mínimos entre eventos (15 min a 24 h) de acordo com a estatística de Anderson-Darling

AD - P								AD - I							
F <sub>n</sub>	15 m	1 h	2 h	3 h	<b>6 h</b>	12 h	24 h	F <sub>n</sub>	15 m	1 h	2 h	3 h	<b>6 h</b>	12 h	24 h
N	285.3	95.6	66.9	51.5	34.4	26.6	17.9	N	192.5	81.2	68.7	52.3	45.6	39.4	37.0
LN	63.7	15.3	12.7	10.4	6.9	2.6	1.5	<b>LN</b>	64.0	8.9	4.5	1.8	<b>0.8</b>	0.7	0.5
G	111.9	15.5	6.5	3.1	0.8	1.2	1.2	G	97.1	22.0	15.1	7.3	4.5	3.4	6.4
EX	600.8	149.4	76.6	40.9	7.8	1.7	1.2	EX	86.6	20.2	14.0	6.9	4.9	6.2	18.4
<b>WE</b>	77.0	11.5	5.7	3.0	<b>0.69</b>	1.0	1.0	WE	88.6	20.3	13.8	6.5	3.6	2.2	3.8
<i>P-value</i>								<i>P-value</i>							
F <sub>n</sub>	15 m	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h	F <sub>n</sub>	15 m	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h
N	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	N	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
LN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>LN</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.05</b>	0.0	0.0
G	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	G	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
EX	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	EX	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>WE</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.07</b>	0.0	0.0	WE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
AD - D								AD - IET							
F <sub>n</sub>	15 m	1 h	2 h	3 h	<b>6 h</b>	12 h	24 h	F <sub>n</sub>	15 m	1 h	2 h	3 h	<b>6 h</b>	12 h	24 h
N	236.5	69.3	44.6	29.6	23.9	36.1	23.1	N	535.8	256.0	207.4	183.1	148.4	121.9	81.2
LN	122.8	27.2	19.7	17.7	11.8	3.6	3.1	LN	47.5	8.5	5.3	5.8	8.3	11.1	9.4
G	138.9	20.3	9.8	6.1	2.1	1.3	1.9	G	208.7	78.3	64.6	60.5	55.0	49.8	35.9
EX	187.6	58.6	33.7	18.2	5.6	8.2	22.2	EX	1965.7	504.0	324.3	248.1	165.8	118.1	60.1
<b>WE</b>	118.5	18.5	10.2	7.2	<b>2.5</b>	0.6	1.6	<b>WE</b>	88.6	29.8	27.1	28.7	<b>31.2</b>	31.7	26.0
<i>P-value</i>								<i>P-value</i>							
F <sub>n</sub>	15 m	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h	F <sub>n</sub>	15 m	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h
N	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	N	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
LN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	LN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
G	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	G	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
EX	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	EX	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>WE</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.01</b>	0.0	0.0	<b>WE</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.01</b>	0.0	0.0

P – Altura da chuva (mm); D - Duração da chuva (h); I - Intensidade média da chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ ); IET - tempo entre eventos (h); AD - Estatística de Anderson-Darling. F<sub>n</sub> – Função: N – Normal; LN – Lognormal; G – Gamma; Ex – Exponencial; WE – Weibull; *P-value* – Significância da estatística.

Article

# Canopy Effects on Rainfall Partition and Throughfall Drop Size Distribution in a Tropical Dry Forest

José Bandeira Brasil <sup>1</sup>, Eunice Maia de Andrade <sup>2</sup>, Helba Araújo de Queiroz Palácio <sup>3</sup>, María Fernández-Raga <sup>4,\*</sup>, Jacques Carvalho Ribeiro Filho <sup>1</sup>, Pedro Henrique Augusto Medeiros <sup>5</sup> and Maria Simas Guerreiro <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Department of Agricultural Engineering, Federal University of Ceará—UFC, Fortaleza 60020-181, Brazil; josebandeira@alu.ufc.br (J.B.B.); jacquesfilho@alu.ufc.br (J.C.R.F.)

<sup>2</sup> Department of Soil and Water Conservation, Federal University of the Semi-Arid Region, Mossoró 59625-900, Brazil; eunice.andrade@ufersa.edu.br

<sup>3</sup> Federal Institute of Education, Science and Technology of Ceará—IFCE, Iguatu 63500-000, Brazil; helbaraujo@ifce.edu.br

<sup>4</sup> Department of Applied Physics, University of León, 24071 León, Spain

<sup>5</sup> Federal Institute of Education, Science and Technology of Ceará—IFCE, Maracanaú, Brazil; phamedeiros@ifce.edu.br

<sup>6</sup> FP-ENAS, University Fernando Pessoa, Porto 4249-004, Portugal; mariajoao@ufp.edu.pt

\* Correspondence: maria.raga@unileon.es

**Citation:** Brasil, J.B.; Andrade, E.M.; Palácio, H.A.Q.; Fernández-Raga, M.; Ribeiro Filho, J.C.; Medeiros, P.H.A.; Guerreiro, M.S. **Canopy Effects on Rainfall Partition and Throughfall Drop Size Distribution in a Tropical Dry Forest.** *Atmosphere* **2022**, *13*, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Academic Editor(s): Andy Morse and Martin Gallagher

Received: 13 May 2022

Accepted: 14 July 2022

Published: date

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Abstract:** The energy distribution of natural rainfall droplets at different stages of canopy development in low-latitude semi-arid environments is still understudied. We assessed relationships between canopy development, gross rainfall (P) and throughfall (TF) characteristics in a tropical dry forest (TDF) with a total of 95 events of natural rain during December 2019–July 2021, in Northeast Brazil. One disdrometer was installed in an open field to record the gross rainfall and another under the deciduous vegetation canopy to record the throughfall. At the onset of the rainy season with a low leaf density, a larger fraction of rainfall was converted into throughfall, which declines as the leaf density increases. For events higher than 3 mm, the number of TF drops was always higher than that of P and with smaller diameters, regardless of the stage of canopy development, which indicates fragmenting of the rain drops by the vegetation canopy. The insights of this study are useful to quantify the impact of canopy development stages of a TDF on the characteristics of rainfall reaching the soil forest. Since those characteristics affect the water balance and soil erosion at the hillslope scale, the information provided is crucial for water and soil management.

**Keywords:** tropical dry forest; throughfall; disdrometer; rainfall; raindrops; attenuation of rainfall; Caatinga

## 1. Introduction

Rainfall is the main source of water for tropical dry forests and essential to understand its relation to the hydrological processes of these regions. Vegetation intercepts the raindrops that would otherwise directly reach the forest soil and modifies both the temporal distribution of rainfall [1] and droplet characteristics, such as size, number, and volume [2]. A better understanding of rainfall interactions with vegetation enables model development on ecohydrological processes and supports the better management of natural resources [3–5].

Upon a rainfall event on a vegetated surface, the rain is partitioned into three components: interception—rainfall retained by the vegetation cover that is evaporated back into the atmosphere [4,6], stemflow—flow along the tree stem that conveys water to the root area, an important process during the dryer periods [7], and throughfall—rainfall that reaches the soil with no contact with the vegetation and leaf drip from the canopy [1,2,8,9].

---

## 6 EFEITOS DO DOSEL NA PARTIÇÃO DA CHUVA E DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS GOTAS DA PRECIPITAÇÃO INTERNA EM FLORESTA TROPICAL SECA

---

**Resumo:** A distribuição de energia das gotas de chuva natural em diferentes estágios de desenvolvimento do dossel em ambientes semiáridos de baixa latitude ainda é pouco estudada. Avaliamos as relações entre o desenvolvimento do dossel, as características da precipitação total (P) e precipitação interna (TF) em uma Floresta Tropical Seca (FTS) com um total de 95 eventos de chuva natural durante dezembro de 2019 a julho de 2021, no Nordeste do Brasil. Um disdrômetro foi instalado em campo aberto para registrar a precipitação total e outro sob o dossel da vegetação decídua para registrar a precipitação interna. No início da estação chuvosa com baixa densidade foliar, uma fração maior da chuva foi convertida em precipitação interna, que diminui à medida que a densidade foliar aumenta. Para eventos superiores a 3 mm, o número de gotas de TF foi sempre superior ao de P e com diâmetros menores, independente do estágio de desenvolvimento do dossel, o que indica fragmentação das gotas de chuva pelo dossel da vegetação. As descobertas deste estudo são úteis para quantificar o impacto dos estágios de desenvolvimento do dossel de uma FTS nas características da chuva que atinge o solo da floresta. Como essas características afetam o balanço hídrico e a erosão do solo na escala da encosta, as informações fornecidas são cruciais para o manejo da água e do solo.

**Palavras-chave:** floresta tropical seca; precipitação interna; disdrômetro; chuva; gotas de chuva; atenuação das chuvas; Caatinga.

---

## Canopy effects on rainfall partition and throughfall drop size distribution in a tropical dry forest

---

**Abstract:** The energy distribution of natural rainfall droplets at different stages of canopy development in low-latitude semi-arid environments is still understudied. We assessed relationships between canopy development, gross rainfall (P) and throughfall (TF) characteristics in a tropical dry forest (TDF) with a total of 95 events of natural rain during December 2019–July 2021, in Northeast Brazil. One disdrometer was installed in an open field to record the gross rainfall and another under the deciduous vegetation canopy to record the throughfall. At the onset of the rainy season with a low leaf density, a larger fraction of rainfall was converted into throughfall, which declines as the leaf density increases. For events higher than 3 mm, the number of TF drops was always higher than that of P and with smaller diameters, regardless of the stage of canopy development, which indicates fragmenting of the rain drops by the vegetation canopy. The insights of this study are useful to quantify the impact of canopy development stages of a TDF on the characteristics of rainfall reaching the soil forest. Since those characteristics affect the water balance and soil erosion at the hillslope scale, the information provided is crucial for water and soil management.

**Keywords:** tropical dry forest; throughfall; disdrometer; rainfall; raindrops; attenuation of rainfall; Caatinga.

## 6.1 INTRODUÇÃO

A chuva é a principal fonte de água para as florestas tropicais secas e essencial para entender sua relação com os processos hidrológicos dessas regiões. A vegetação intercepta as gotas de chuva que de outra forma atingiriam diretamente o solo da floresta e modifica tanto a distribuição temporal das chuvas (Lüpke et al., 2019) quanto as características das gotas, como tamanho, número e volume (Levia et al., 2019). Uma melhor compreensão das interações da chuva com a vegetação permite o desenvolvimento de modelos sobre os processos ec hidrológicos e apoia a melhor gestão dos recursos naturais (Nanko et al., 2006; Zabret et al., 2018; Brasil et al., 2020).

Em um evento natural de chuva em uma superfície vegetada, a chuva é dividida em três componentes: interceptação – chuva retida pela cobertura vegetal que é evaporada de volta para a atmosfera (Crockford e Richardson, 2000; Zabret et al., 2018), escoamento pelo tronco – fluxo ao longo do tronco da árvore que transporta água para a área radicular, processo importante durante os períodos de seca (Van Stan e Friesen, 2020), e precipitação interna – chuva que atinge o solo sem contato com a vegetação e gotejamento das folhas do dossel (Levia et al., 2017; Lüpke et al., 2019; Levia et al., 2019; Sadeghi et al., 2020).

Dos três componentes, a precipitação interna representa o maior percentual de entrada de água no solo, variando entre 70% e 80% em locais temperados, boreais e nos trópicos, respectivamente, e aproximadamente 70% em regiões áridas e semiáridas (Sadeghi et al., 2020). Assim, a vegetação influencia a distribuição espaço-temporal da precipitação interna em termos de quantidade de chuva, intensidade da chuva, diâmetro da gota, velocidade da gota e energia cinética, impactando os processos hidrológicos dos solos florestais (Frasson e Krajewski, 2011; Levia et al., 2017; Nanko et al., 2008, 2011).

As características da vegetação, como os estágios de desenvolvimento do dossel, formato das folhas e galhos (Muzyło et al., 2012; Tanaka et al., 2015; Fathizadeh et al., 2017; Sadeghi et al., 2018) são conhecidas por promover diferentes impactos sobre os processos hidrológicos em diferentes regiões (Levia e Frost, 2006; Zimmermann e Zimmermann, 2014). A distribuição do tamanho das gotas da precipitação interna sob diferentes tipos de árvores foi avaliada em diferentes partes do globo (Nanko et al., 2006, 2008, 2011, 2013, 2016; Levia et al., 2017; Zabret et al., 2017; Lüpke et al., 2019; Levia et al., 2019) e sob uma plantação de milho (Frasson e Krajewski, 2011).

A distribuição do tamanho da gota é uma variável fundamental para entender a dinâmica de fracionamento das gotas sob o dossel da vegetação, e pode ser usada para melhor estimar a energia cinética da precipitação interna em estudos de erosão do solo (Levia et al., 2017), uma vez que a velocidade terminal e o potencial erosivo da chuva são influenciados pelo tamanho da gota e pela intensidade da chuva. Estudos têm sido conduzidos para avaliar o efeito das características da chuva no processo de interceptação em florestas tropicais secas (FTS) (Izidio et al., 2013; Brasil et al., 2018; Queiroz et al., 2020), na modelagem da interceptação (Medeiros et al., 2009; Lopes et al., 2020) e na caracterização da precipitação interna em diferentes estágios de desenvolvimento do dossel e escalas de tempo (Brasil et al., 2020). No entanto, em ambientes semiáridos, variáveis como diâmetro e velocidade das gotas dificilmente são incluídas nesses estudos devido ao alto custo dos equipamentos de aquisição de dados, como os disdrômetros. Estudos sobre o papel atenuante da vegetação decídua da FTS no tamanho e velocidade das gotas da precipitação interna em diferentes estágios de desenvolvimento do dossel ainda são escassos.

Estudos realizados em regiões com outros climas e tipos de vegetação indicam que o dossel desempenha um papel importante na mudança das características das chuvas que atingem o solo (por exemplo, duração, intensidade e distribuição do tamanho das gotas), mas os dados são escassos em regiões semiáridas de baixa latitude. Eventos de chuva de alta intensidade nessas áreas pode ser fortemente impactados pelo dossel, mas o padrão decíduo da vegetação pode influenciar seu papel na partição da chuva ao longo do tempo. Portanto, este trabalho tem como objetivo analisar o efeito da vegetação da floresta tropical seca na precipitação interna em diferentes estágios de desenvolvimento do dossel em um ambiente semiárido de baixa latitude sob eventos naturais de chuva.

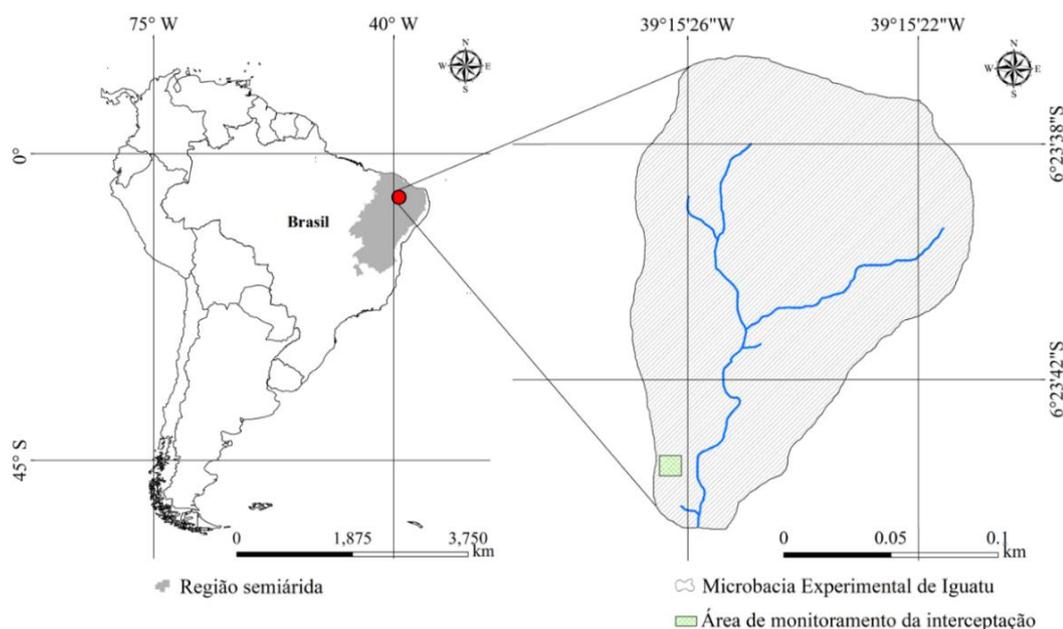
As descobertas deste estudo são úteis para quantificar o impacto das características da chuva e estágio de desenvolvimento do dossel da FTS na partição da chuva e redistribuição das gotas da precipitação interna para melhor entender os efeitos do dossel sob a floresta nos processos de erosão do solo, balanço hídrico, umidade do solo e geração de escoamento em ambientes semiáridos.

## 6.2 MATERIAL E MÉTODOS

### Descrição do local de estudo

A área de estudo localiza-se na microbacia experimental de Iguatu, sub-bacia da bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, Ceará, Nordeste do Brasil. As coordenadas geográficas do ponto central da área são:  $6^{\circ}23' S$  e  $39^{\circ}15' W$  (Figura 7), com altitude de 218 m acima do nível do mar.

Figura 7 - Localização da área experimental no município de Iguatu-Ceará, Nordeste do Brasil



Fonte: Próprio autor.

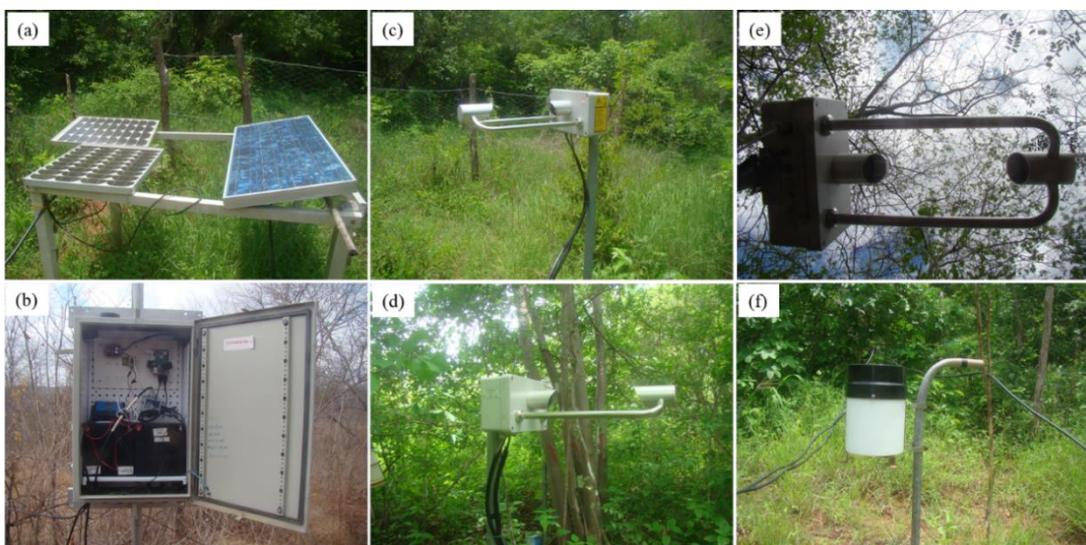
O clima predominante é o BSw'h' (semiárido quente), com temperatura média mensal sempre acima de  $18^{\circ} C$  no mês mais frio e com estações chuvosa e seca bem definidas. Com uma precipitação média anual de 998 mm, 84% concentram-se na estação chuvosa. Março e abril concentram 43% dos eventos anuais (Brasil et al., 2018), com uma elevada ocorrência de dias secos consecutivos (Guerreiro et al., 2013). O semestre seco ocorre de junho a dezembro, com apenas 1% do total anual de chuvas (Brasil et al., 2018), evidenciando a alta variabilidade temporal da precipitação (Guerreiro et al., 2013; Campos et al., 2020). A evapotranspiração potencial anual supera os 2000 mm, que está dentro da razão de 0,2 e 0,5 precipitação-evapotranspiração potencial descrita por (Scholes, 2020) para regiões semiáridas e tem um índice de aridez de 0,48 (Thornthwaite, 1948) que também classifica a região como semiárida, onde o déficit hídrico é observado de 9 a 10 meses por ano (Guerreiro et al., 2021).

O local em estudo é composto por Floresta Tropical Seca (FTS), também conhecida como Domínio Fitogeográfico da Caatinga, em regeneração desde 1978. As espécies mais frequentes pertencem às famílias *Croton blanchetianus*, *Mimosa caesalpinifolia* e *Aspidosperma pyrifolium*, que representam 62% da densidade relativa total (Andrade et al., 2021). Além disso, a altura média das plantas é de 5,2 m (Andrade et al., 2021). A vegetação da FTS é caracterizada por ser do tipo xerófila, de fisionomia e florística variadas composta por espécies de pequeno a médio porte, caducifólias, folhas finas e pequenas, fechamento dos estômatos, presença de sistemas de raízes bem desenvolvidos e adaptada ao déficit hídrico relacionado à seca, em decorrência da irregularidade das chuvas.

### **Monitoramento da chuva com disdrômetro**

A configuração experimental (Figura 8), mostra a logística adotada para fornecer energia para funcionamento dos disdrômetros, uma vez que não há eletricidade na área de estudo (Figura 8a, 8b). Para evitar erros de leitura de tempo, o global positioning system (GPS) foi usado para ajustes de data e hora. Os dados foram armazenados em intervalo de 1 minuto, em memória externa, conectado a um minicomputador (Raspberry) em formato txt e baixados através da rede wifi fornecida pela interface do Raspberry. Como auxílio e referência aos dados do disdrômetro, um pluviógrafo de báscula do tipo HOBO (Measurement Systems Ltd., Newbury, Reino Unido) com uma área de superfície de 188,7 cm<sup>2</sup> com um registrador de dados, foi instalado em campo aberto para monitorar a precipitação total (Figura 8f) a aproximadamente 30 m do disdrômetro instalado no campo aberto.

Figura 8 - Configuração experimental da instalação dos equipamentos: (a) Paineis solar, (b) caixa onde estão as baterias, conversores e Raspberry, (c) disdrômetro em campo aberto para monitorar a precipitação total, (d, e) vista do disdrômetro sob a vegetação da FTS, (f) pluviógrafo de báscula para monitorar a precipitação total



Fonte: Próprio autor.

Dois monitores de precipitação a laser - disdrômetro, Thies Clima 5.4110.xx.x00. V2.5x STD (Thies Clima, 2007), foram posteriormente colocados a 30 m de distância em estações terrestres para medir as propriedades das gotas sob diferentes condições - um em campo aberto para registrar a precipitação total - P (Figura 8c) e outro sob o dossel da vegetação para registrar a precipitação interna - TF (Figura 8d, 8e). As rvores sob as quais o disdrômetro foi colocado são *Mimosa caesalpinifolia* e *Aspidosperma pyrifolium* e têm suas folhas e galhos a distâncias entre 1,5 e 5 m acima do disdrômetro. Os disdrômetros não foram movimentados durante todo o período de estudo, de dezembro de 2019 a julho de 2021, e foram instalados a uma altura de 1,5 m em relação ao nível do solo.

O disdrômetro consiste em uma fonte de laser, dois conjuntos de lentes, um receptor e uma unidade de processamento de sinal digital. Quando uma partícula de precipitação cai através do feixe de luz (rea de medição de 45,6 cm<sup>2</sup>) o sinal de recepção é reduzido. O diâmetro da partícula é calculado a partir da amplitude da redução. Além disso, a velocidade de queda da gota  determinada pela duração reduzida do sinal. Mais informações podem ser encontradas no manual do equipamento (Thies Clima, 2007) e em estudos que monitoraram as características das chuvas, tanto em campo aberto como sob a vegetação (Nanko et al., 2006; 2008; Fernández-Raga et al., 2010; Frasson e Krajewski, 2011; Lpke et al., 2019; Levia et al., 2019).

O monitor de precipitação a laser – disdrômetro fornece uma tabela (22 classes de diâmetro e 20 de velocidade) contendo um resumo de todas as gotas registradas que passam por sua área de detecção de 45,6 cm<sup>2</sup>, fornecidas a cada minuto em um arquivo Txt. Cada elemento desta tabela está associado a um diâmetro e classe de velocidade (Tabela 5). O primeiro elemento armazena o número de gotas com um diâmetro entre 0,125 e 0,250 mm e uma velocidade entre 0 e 0,2 m/s; o segundo elemento armazena o número de gotas com o mesmo diâmetro, mas com velocidades entre 0,2 e 0,4 m/s. Os 20 elementos seguintes abrangem todas as velocidades para a próxima classe de diâmetro e assim por diante, cobrindo diâmetros de 0,125 mm e 8 mm e velocidades variando de 0,2 m/s a 10 m/s (Tabela 5). O resultado é um total de 440 colunas – matriz 22 x 20, conforme mostrado em (THIES CLIMA, 2007).

Tabela 5 - Classes de diâmetro e velocidades das gotas registradas no disdrômetro

Classe	Classe de diâmetro das gotas			Classe de velocidade das gotas		
	D (mm)	LC (mm)	DMC (mm)	V (m/s)	LC (m/s)	VMC (mm)
1	≥ 0.125	0.125	0.1875	≥ 0.000	0.200	0.652
2	≥ 0.250	0.125	0.3125	≥ 0.200	0.200	1.212
3	≥ 0.375	0.125	0.4375	≥ 0.400	0.200	1.779
4	≥ 0.500	0.25	0.6250	≥ 0.600	0.200	2.595
5	≥ 0.750	0.25	0.8750	≥ 0.800	0.200	3.567
6	≥ 1.000	0.25	1.1250	≥ 1.000	0.400	4.394
7	≥ 1.250	0.25	1.3750	≥ 1.400	0.400	5.101
8	≥ 1.500	0.25	1.6250	≥ 1.800	0.400	5.718
9	≥ 1.750	0.25	1.8750	≥ 2.200	0.400	6.267
10	≥ 2.000	0.5	2.2500	≥ 2.600	0.400	6.986
11	≥ 2.500	0.5	2.7500	≥ 3.000	0.400	7.759
12	≥ 3.000	0.5	3.2500	≥ 3.400	0.800	8.318
13	≥ 3.500	0.5	3.7500	≥ 4.200	0.800	8.693
14	≥ 4.000	0.5	4.2500	≥ 5.000	0.800	8.930
15	≥ 4.500	0.5	4.7500	≥ 5.800	0.800	9.061
16	≥ 5.000	0.5	5.2500	≥ 6.600	0.800	9.123
17	≥ 5.500	0.5	5.7500	≥ 7.400	0.800	9.170
18	≥ 6.000	0.5	6.2500	≥ 8.200	0.800	9.212
19	≥ 6.500	0.5	6.7500	≥ 9.000	1.000	9.249
20	≥ 7.000	0.5	7.2500	≥ 10.000	10.000	-
21	≥ 7.500	0.5	7.7500			
22	≥ 8.000	1	-			

Fonte: Próprio autor.

D - Diâmetro (mm); LC - Largura da classe (mm); DMC - Diâmetro Médio da classe (mm); V - Velocidade (m/s); VMC - Velocidade Média da classe (mm) – adaptada de Fernández-Raga et al., 2010

Ambos os disdrômetros (P-TF) registraram as seguintes características da chuva: altura de chuva (mm), intensidade média da chuva (mm h<sup>-1</sup>), duração da chuva (h), tamanho médio

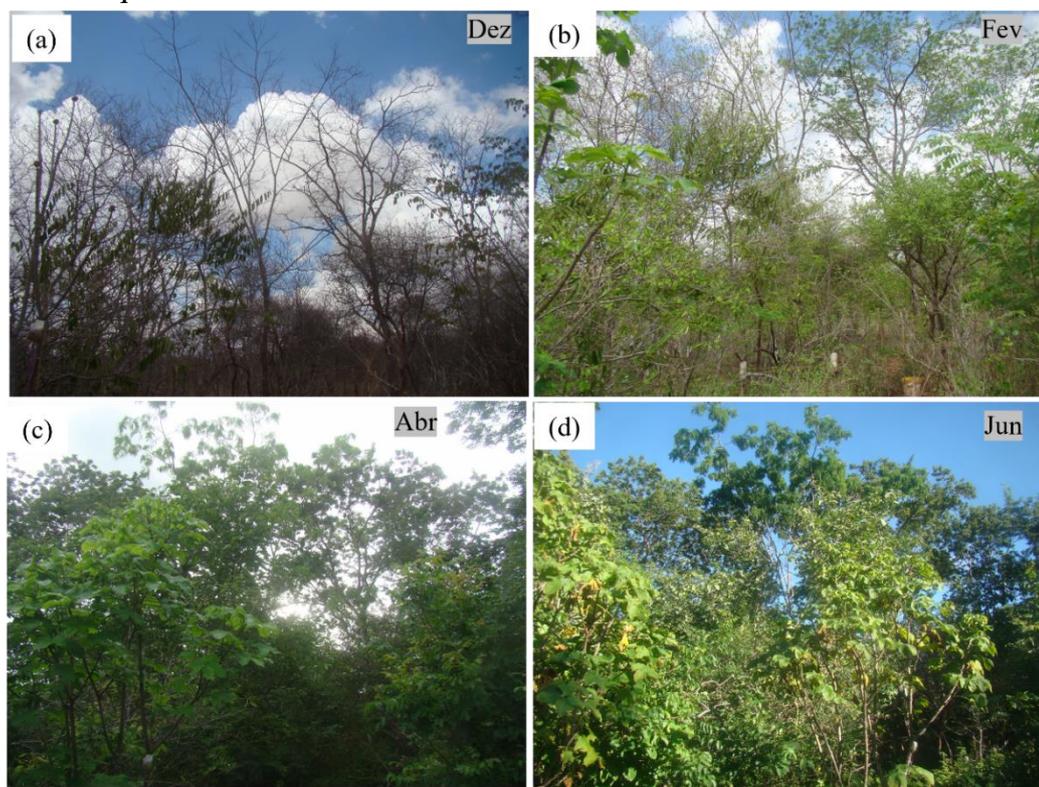
das gotas, diâmetro da gota (mm), velocidade da gota (m/s), distribuição do tamanho da gota, número total de gotas, volume total de gotas (mm<sup>3</sup>). Essas características foram registradas em intervalos de 1 minuto.

Os eventos de chuva individuais foram separados por um tempo mínimo entre eventos (MIET) de 6 horas, pois é um critério comumente utilizado em estudos hidrológicos e foi estabelecido por Brasil et al. (2022) na mesma área de estudo. Durante o período de estudo, ocorreram 122 eventos de chuvas naturais, mas devido a problemas técnicos, o disdrômetro que registra os dados de precipitação interna totalizou 95 eventos de chuva. Para análises comparativas entre os dados de P e TF, foram utilizados apenas os eventos que registraram tanto a precipitação total quanto a precipitação interna.

### **Estágios de desenvolvimento do dossel**

A característica decídua da floresta tropical seca impacta na dinâmica do processo de interceptação da chuva (Brasil et al., 2020); assim, as mudanças na densidade foliar durante a estação chuvosa e seca foram monitoradas. Avaliamos o desenvolvimento da vegetação durante o período de estudo por meio de registros fotográficos (Figura 9) feitos com uma câmera NIKON D7200 SRLD, sempre no mesmo local e na mesma posição (altura e ângulo). A associação do aspecto da vegetação (a partir de fotografias) e densidade foi corroborada pelo estudo desenvolvido por Almeida et al. (2019) para a vegetação da Caatinga, e aplicado com o mesmo objetivo por Brasil et al. (2020) em nosso local de estudo. A densidade do dossel foi utilizada como proxy do Índice de Área Foliar para separar os diferentes estágios de desenvolvimento do dossel e avaliar o papel da vegetação na redistribuição das gotas da precipitação interna.

Figura 9 - Registros fotográficos das mudanças na densidade foliar durante o período de estudo: (a, b) durante o desenvolvimento foliar, (c) após o desenvolvimento total da densidade foliar e (d) período de queda das folhas



Fonte: Próprio autor.

As fases de desenvolvimento do dossel foram divididas em três fases (Tabela 6): a primeira fase correspondendo ao desenvolvimento foliar após a estação seca devido à natureza decídua da vegetação e ausência de folhas durante a longa estação seca (Figura 9a) e a segunda fase, ou o pleno desenvolvimento da massa foliar (Figura 9c), iniciando no final de fevereiro após a ocorrência dos primeiros eventos de chuva (Figura 9b) e durando até abril. Na terceira fase (maio-julho) ocorreu a queda das folhas, reduzindo a densidade do dossel, conforme observado na figura 9d.

Tabela 6 - Resumo dos três estágios de desenvolvimento do dossel em função da altura da chuva e densidade do dossel

Período	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Estágios do dossel	Baixa densidade			Alta densidade		Queda das folhas	
P total $\leq 5$ mm	37.9 mm			52.6 mm		15.0 mm	
Número de eventos	15			22		8	
P total $> 5$ mm	248.9 mm			779.9 mm		114.6 mm	
Número de eventos	8			35		7	

Fonte: Próprio autor.

P total—chuva acumulada (mm) por classe em função do estágio de desenvolvimento do dossel.

## **Análise estatística dos dados**

A rotina para processamento dos dados do disdrômetro - matriz 22 x 20 (22 classes de diâmetro e 20 de velocidade) desenvolveu-se em planilha eletrônica no software Excel.

Análises de regressão linear e gráficos de boxplot foram empregados para avaliar a distribuição das características da precipitação total (P) e precipitação interna (TF) em função dos estágios de desenvolvimento do dossel e classes de chuva.

A normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, que indicou uma série não normal ( $p < 0,01$ ). Assim, o teste não paramétrico da soma dos postos de Wilcoxon foi usado para comparar as medianas dos dados de P e TF ao nível de confiança de 99% nos diferentes estágios de desenvolvimento do dossel e classes de chuva.

Todas as análises estatísticas foram realizadas com o programa Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versão 16.0, MINITAB versão 18 e Microsoft Excel.

## **6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Características dos eventos de chuva**

Durante o período de estudo, de dezembro de 2019 a julho de 2021, 95 eventos de chuva foram monitorados tanto para precipitação total quanto para precipitação interna. A separação de eventos de chuva foi baseada em um tempo mínimo de 6 horas entre eventos, como sugerido por (Brasil et al., 2022) para esta região. A precipitação total do evento variou de 0,42 a 116,70 mm (Tabela 7), evidenciando a alta variabilidade das chuvas na região (Figura 10). A maior frequência de ocorrência (48%) foi registrada para eventos com precipitação total inferior a 5,0 mm (Tabela 7 e Figura 10) – a alta ocorrência de pequenos eventos de chuva e alta variabilidade temporal são características das regiões semiáridas tropicais de baixa latitude (Brasil et al., 2018; Guerreiro et al., 2021). Para mais informações sobre a contribuição dos eventos de baixa altura pluviométrica para o entendimento dos processos hidrológicos, consulte as pesquisas de Brasil et al. (2020); Andrade et al. (2020) em uma região semiárida tropical de baixa latitude.

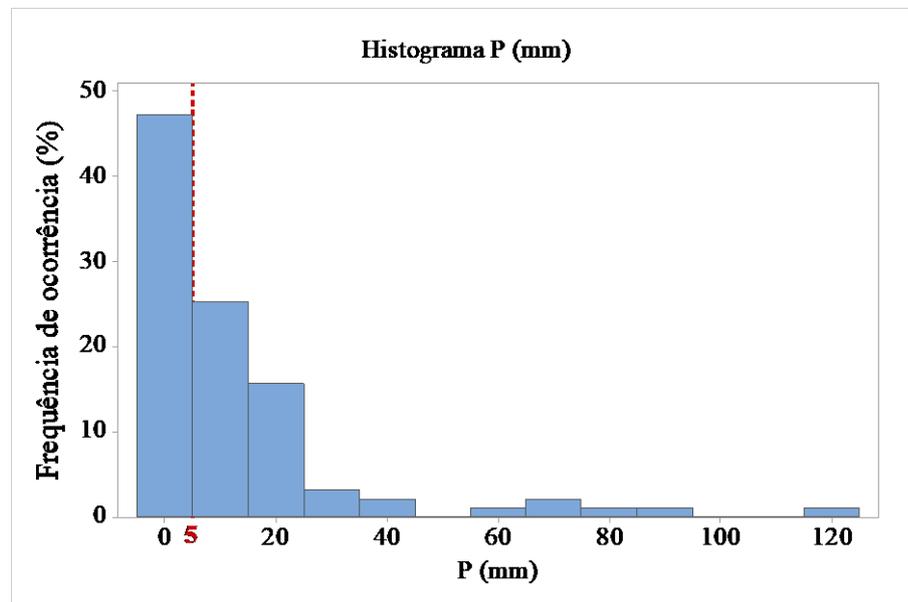
Tabela 7 - Estatística descrita dos eventos de chuva monitorados

Todos os eventos								
Variáveis	Número de eventos	Média	DP	Min	Max	Q1 - 25	Q2 - 50	Q3 - 75
P (mm)	95	13.15	19.83	0.42	116.7	1.76	5.36	16.73
Classes de chuva								
P ≤ 5 mm	45	2.34	1.46	0.42	4.98	1.17	1.7	3.62
P > 5 mm	50	22.87	23.45	5.27	116.7	9.12	15.7	23.8
Estágios do dossel	P ≤ 5 mm		P > 5 mm					
	DP	CV	DP	CV				
Baixa densidade	1.42	0.56	29.7	0.95				
Alta densidade	1.47	0.63	25.07	1.01				
Queda das folhas	1.27	0.78	12.92	0.64				

Fonte: Próprio autor.

P-Chuva (mm); Percentis-Q1-25th, Q2-50th (Mediana) e Q3-75th; DP-desvio padrão; e CV-coeficiente de variação.

Figura 10 - Frequência de ocorrência dos eventos de chuva monitorados



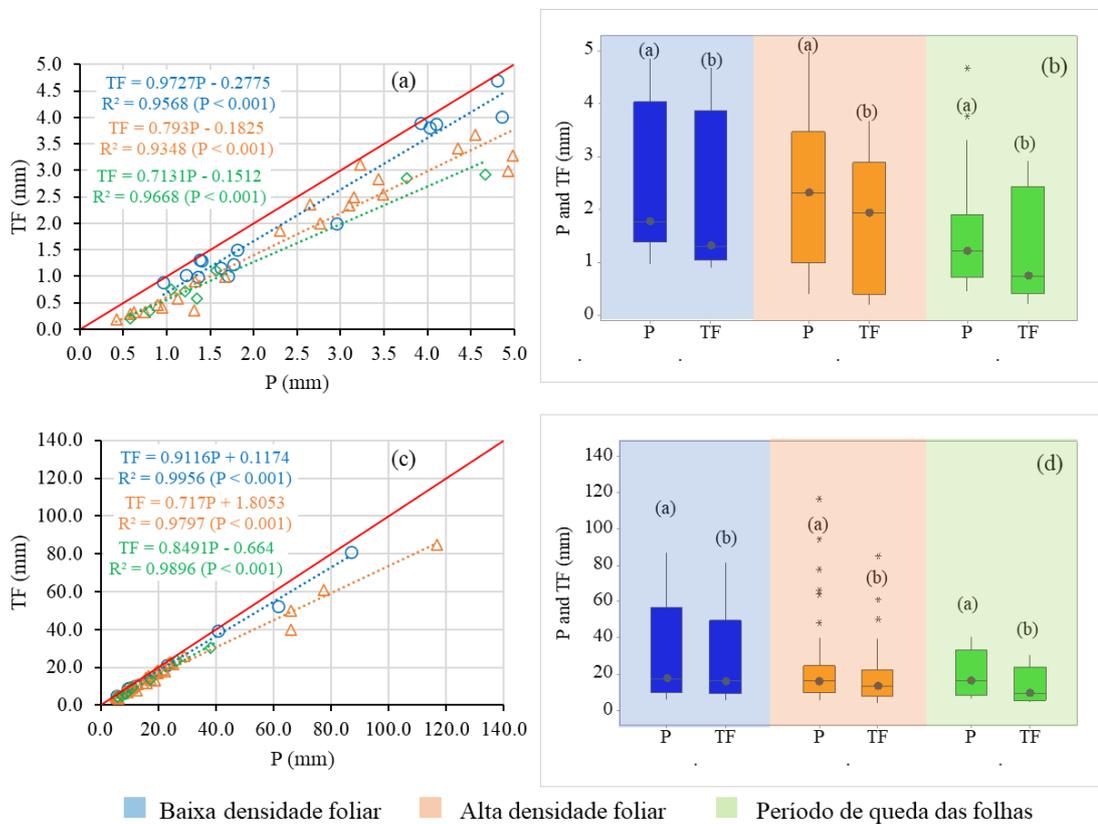
Fonte: Próprio autor.

Dada a incerteza no regime de chuvas (seca e chuvas irregulares) na região em estudo e a vegetação da Floresta Tropical Seca - FTS estar adaptada ao déficit hídrico, os eventos de chuvas foram separados em duas classes distintas de chuva (Tabela 7, Figura 10): Eventos de menor altura pluviométrica ( $P \leq 5,0$  mm) e eventos de maior altura pluviométrica ( $P > 5,0$  mm). Ambas as classes foram investigadas de acordo com a cobertura do dossel da FTSS nos três estágios de desenvolvimento apresentados em 2.3 e características da precipitação total (P) e precipitação interna (TF).

### Eventos de chuva ( $P \leq 5,0$ mm e $P > 5,0$ mm)

A relação entre precipitação total (P) e precipitação interna (TF) nos três estágios de desenvolvimento do dossel é mostrada para as duas classes de chuva analisadas (Figura 11). A precipitação interna aumenta linearmente com a altura pluviométrica (Figura 11a, 11c), com nível de significância ( $P < 0.001$ ) como visto nas pesquisas de Zabret et al. (2018) e Queiroz et al. (2020).

Figura 11 - Relação entre a precipitação total (P) e precipitação interna (TF) nos três estágios de desenvolvimento do dossel: (a, b -  $P \leq 5,0$  mm) e (c, d -  $P > 5,0$  mm)



Fonte: Próprio autor.

Letras diferentes (a, b) representam uma mediana estatisticamente diferente ao nível de 1% pelo teste de Wilcoxon.

De acordo com o Coeficiente de Variação – CV para a classe de chuva  $P \leq 5,0$  mm é de 0,65 e 0,97  $P > 5,0$  mm. Assim, quando se analisa as interações entre os estágios de desenvolvimento do dossel e a altura pluviométrica (Figura 11), observa-se que para eventos maiores ( $P > 5,0$  mm) ocorre maior variabilidade nos valores de precipitação interna de acordo com o desenvolvimento da vegetação como visto pelo maior valor de CV e pela amplitude do Box plot ( $P > 5,0$  mm) Figura 11d.

O caráter decíduo da FTS na região de estudo promoveu mudanças na proporção da chuva convertida em precipitação interna (Figura 11). Nos três estágios de desenvolvimento do dossel, a precipitação interna é estatisticamente menor ( $p < 0.01$ ) do que a precipitação total independentemente do total precipitado. A importância da cobertura vegetal na retenção temporária de água precipitada faz com que os eventos sob a vegetação tenham uma maior duração da chuva, com discutido por pesquisadores como Nanko et al. (2006, 2008); Zabret et al. (2017); Brasil et al. (2020).

Em nosso estudo, a duração média da precipitação interna após a cessação de um evento de chuva foi de 10,6 min e 14,1 min para as classes de chuva  $P \leq 5$  mm e  $P > 5$  mm durante o período de estudo (Tabela 8). No período com alta densidade foliar, para a classe  $P > 5$  mm, a duração da queda foi mais variável e os eventos de maior duração foram mais frequentes, indicando que o dossel saturado continua a fluir em direção ao solo após o término do evento (Zabret et al., 2017; Brasil et al., 2020).

Tabela 8 - Duração média da precipitação interna após a cessação de um evento de chuva

Estágios do dossel	Duração de TF (min)	
	$P \leq 5$ mm	$P > 5$ mm
Baixa densidade	7.50	16.71
Alta densidade	8.76	17.74
Queda das folhas	15.50	7.80
Média para o período	10.59	14.09

Fonte: Próprio autor.

No entanto, a retenção no dossel é muito difícil de quantificar (Schou et al., 2012), pois não depende apenas da interceptação física das gotas, mas é fortemente influenciada pela deposição através do tronco ou em gotas menores que modificam sua trajetória inicial, superestimando a retenção total se modelado de forma simplista. Após a interceptação, uma gota pode ficar retida na folha ou ricochetear na superfície ou quebrar em uma série de gotas menores (Tadros, 1987). Essas gotas saltitantes e quebrando podem continuar seu caminho através do dossel, depositando-se em níveis mais baixos ou no solo, ou podem ser retidas, dependendo das propriedades físicas e químicas da gota e da folha (Jiang et al., 2021).

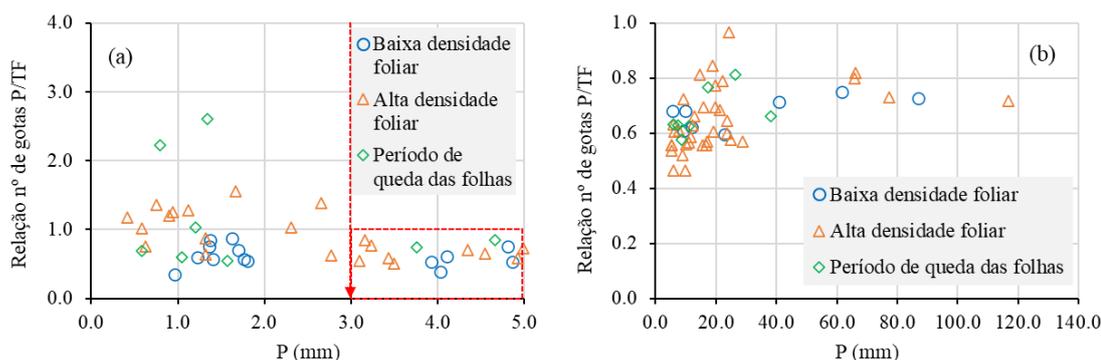
Na fase de baixa densidade foliar de desenvolvimento do dossel (Figura 11) os valores de precipitação interna são próximos aos observados para a precipitação total, seja para  $P \leq 5,0$  mm como para  $P > 5,0$  mm, como esperado (Van Stan e Friesen, 2020). Apesar de nessa fase do dossel mais de 90% da precipitação total se transformar em precipitação interna, as mesmas diferiram entre si ao nível de significância de 1% (Figura 11b, 11d).

Com o desenvolvimento do dossel durante o período chuvoso e o consequente aumento da densidade foliar, a relação P/TF diminuiu 23% e 11,7% para  $P \leq 5,0$  mm e  $P > 5,0$  mm, respectivamente (Figura 11a, 11c). Essa redução ocorre em função do processo de retenção das chuvas pelo dossel da vegetação em que 70% da precipitação total é convertida em precipitação interna (Figura 11a, 11c), seja para ( $P \leq 5,0$  mm e  $P > 5,0$  mm), ao nível de significância de 1%.

Na terceira e última fase de desenvolvimento do dossel, quando se inicia o processo de senescência das folhas há uma continuidade da redução do efeito da copa sobre o processo de interceptação e 70 a 80% da precipitação total é convertida em precipitação interna (Figura 11a, 11c), para ( $P \leq 5,0$  mm e  $P > 5,0$  mm), ao nível de significância de 1%.

A capacidade da FTS de interceptar a chuva é confirmada pela razão do número total de gotas de P para TF, em relação a P (Figura 12). No início da estação chuvosa, quando a vegetação apresenta baixa densidade foliar, observamos que, para  $P \leq 5,0$  mm, o número total de gotas de TF foi sempre superior ao de P (Figura 12a). O limiar da altura pluviométrica para que o número de gotas de TF seja sempre maior ao registrado na precipitação total é 3.0 mm (Figura 12a e 12b), independente do estágio de desenvolvimento do dossel e total precipitado.

Figura 12 - Relação do número total de gotas da precipitação total (P) e precipitação interna (TF) em relação à precipitação total (P) para os três estágios de desenvolvimento do dossel para (a)  $P \leq 5,0$  mm e (b)  $P > 5,0$  mm



Fonte: Próprio autor.

A linha vermelha indica o limite de chuva para o número de gotas de TF ser maior que P.

Esses resultados confirmam que, para um evento de chuva abaixo de 3,0 mm sobre uma vegetação totalmente desenvolvida, uma maior porcentagem de água precipitada fica retida nas folhas e galhos, contribuindo para maiores perdas por interceptação (Zabret et al., 2018; Brasil et al., 2018) - os menores eventos de chuva podem não atingir a capacidade de retenção de água

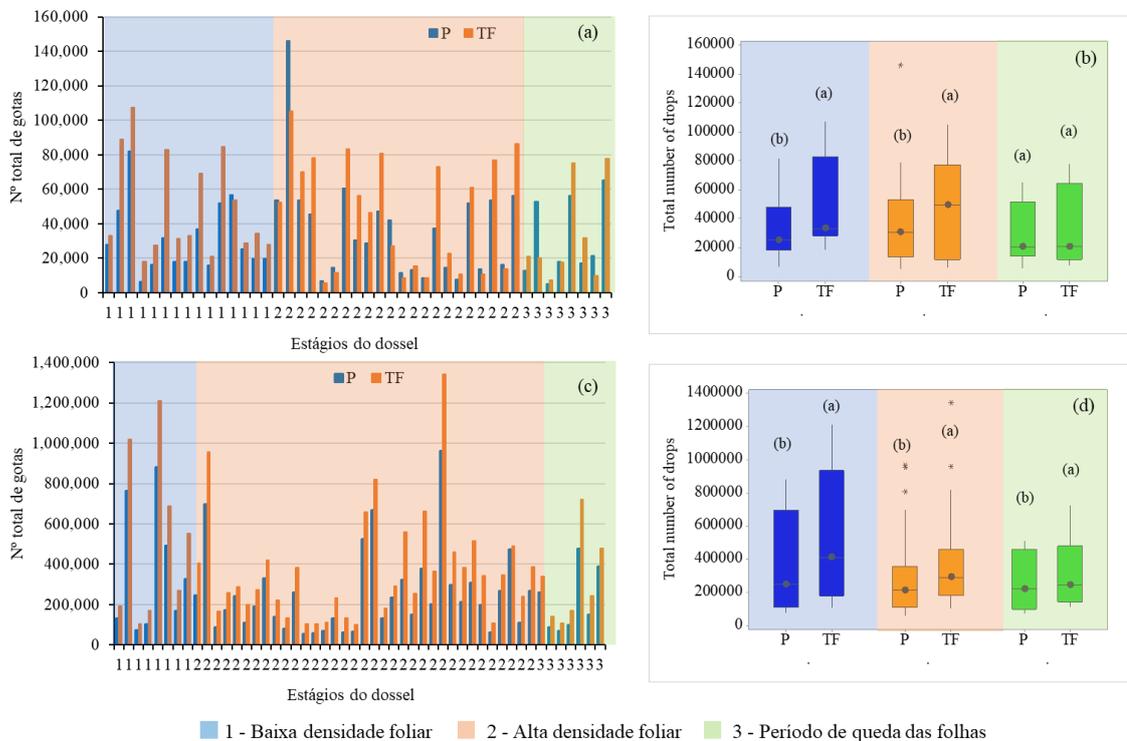
da vegetação. Quando essa capacidade é atingida, o saldo após a retenção é geralmente pequeno. Assim, o número de gotas de P é maior que as gotas de TF (Figura 12a), considerando que a capacidade de vegetação da FTS varia de 0,5 a 1,00 mm, conforme descrito por (Medeiros et al., 2009; Brasil et al., 2020).

Com o desenvolvimento do dossel durante o período chuvoso e o consequente aumento da densidade foliar, observou-se uma maior influência da vegetação no processo de interceptação, resultando em menores valores da razão entre precipitação total e precipitação interna (Brasil et al., 2020). Os dosséis da vegetação interceptam a chuva, alterando a sua distribuição e quantidade (Crockford e Richardson, 2000) e, conseqüentemente, o número de gotas de P difere de TF (Lüpke et al., 2019).

No entanto, à medida que a chuva persiste, a capacidade de armazenamento do dossel é atingida e as perdas por interceptação diminuem relativamente, conforme relatado por Toba e Ohta (2005). O molhamento do dossel tende a aumentar o número de pontos de gotejamento sob as superfícies das folhas e promover a formação de um maior número de gotas abaixo da vegetação (Nanko et al., 2008), devido à ocorrência de chuvas superiores a 3 mm, independente do estágio de desenvolvimento do dossel (Figura 12a e 12b).

Ao analisar a relação número total de gotas da precipitação total em relação a precipitação interna, em função do total precipitado e estágios de desenvolvimento do dossel na escala dos eventos, a precipitação interna sempre registra maiores quantidades de gotas do que a precipitação total ao nível de significância de 1% para chuvas superiores a 3 mm (Figura 13). O aumento do número de gotas sob o dossel ampliou o tempo de contato da água com o solo, conforme discutido por pesquisadores como (Nanko et al., 2006, 2011; Zabret et al., 2017; Brasil et al., 2020), aumentando a oportunidade de infiltração e outros processos hidrológicos na bacia.

Figura 13 - Relação do número total de gotas da precipitação total (P) e da precipitação interna (TF) nos três estágios de desenvolvimento do dossel: (a, b -  $P \leq 5,0$  mm) e (c, d -  $P > 5,0$  mm)



Fonte: Próprio autor.

Letras diferentes (a, b) representam uma mediana estatisticamente diferente ao nível de 1% pelo teste de Wilcoxon.

Considerando todos os eventos de P e TF, a vegetação converte a maior parte (80%) da chuva em precipitação interna, podendo atingir o solo da floresta como precipitação interna livre e direta, a qual é subdividida em precipitação interna direta de respingo e gotejamento do dossel (Nanko et al., 2006; Levia et al., 2017). Entretanto, para a classe de chuva  $P \leq 5,0$  mm, há maior ocorrência (1,9 vezes) de pequenos diâmetros de gotas ( $0,125 < D1 \leq 0,250$  mm) de TF em relação a P, estatisticamente diferente ao nível de significância de 1%. O maior número de gotas de quando comparado à P, sugere que a morfologia da vegetação afetou as gotas dividindo-as em gotas menores, como observado por (Frasson e Krajewski, 2011).

A precipitação interna direta de respingo é frequentemente categorizada como gotículas com diâmetro inferior a 1,5 mm geradas pelo momento transferido pela chuva para o dossel ou pela redistribuição da água interceptada no dossel, enquanto o gotejamento do dossel é composto por gotículas através da precipitação interna com diâmetros  $> 1,5$  mm (Nanko et al., 2006; 2008; 2016; Zabret et al., 2017).

As maiores concentrações de gotas da precipitação interna ocorrem nas primeiras classes de diâmetro de gotas para ambas as classes de eventos ( $P \leq 5,0$  mm e  $P > 5,0$  mm) (Figura 13)

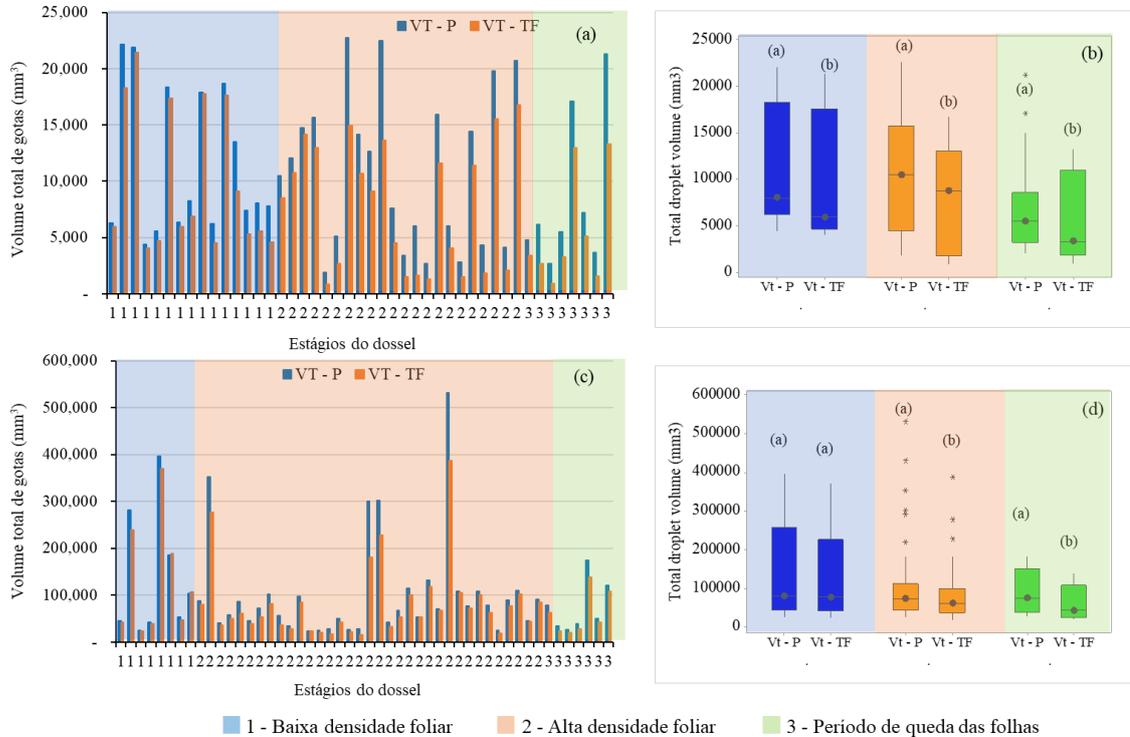
e podem ser explicadas pelo fracionamento da precipitação interna (Levia et al., 2019; Nanko et al., 2006) pela cobertura da FTS. Apesar da precipitação interna direta de respingo ter diâmetros menores do que o gotejamento, há um aumento no número de gotas, conforme observado neste estudo.

Estudos realizados em outras partes do mundo mostraram que a distribuição do tamanho das gotas de TF varia entre e dentro dos eventos de chuva devido à forte vibração do vento dentro do dossel que altera a direção da gota e, assim, o contato da gota com os galhos e ramos da vegetação quebra a gota em gotículas menores (Levia et al., 2017, 2019; Lüpke et al., 2019). Frasson e Krajewski (2011) concluíram que gotas com pequenos diâmetros  $0,125 < D1 \leq 0,500$  mm) foram mais frequentes na precipitação interna sob a cultura do milho.

O número total de gotas que ocorrem nos diâmetros pequenos ( $D < 1,5$  mm) aumenta devido à precipitação interna direta de respingo. O impacto de gotas maiores na folhagem gera gotas de respingo, principalmente quando a chuva total é de maior intensidade e ventos fortes empurram a folhagem durante os eventos de alta altura pluviométrica (Levia et al., 2017; 2019). Identificamos que o número de gotas por evento está fortemente correlacionado por volume de precipitação, independente do estágio de desenvolvimento do dossel. Esses resultados indicam que para além da precipitação interna aumentar com a altura pluviométrica, o número de gotas da precipitação interna também aumenta, o que também foi observado por Nanko et al. (2006); Zabret et al. (2018).

Como mostrado anteriormente, existe uma alta frequência de ocorrência de quebra das gotas da precipitação interna em gotas menores devido ao processo de precipitação interna direta de respingo. No entanto, ao se analisar os dados de precipitação total e precipitação interna em termos de Volume Total (VT -  $\text{mm}^3$ ), os VT de gotas da precipitação total é sempre maior que o volume da precipitação interna, como esperado, ao nível de significância de 1% (Figura 14).

Figura 14 - Relação do volume total de gotas da precipitação total (P) e da precipitação interna (TF) em diferentes estágios de desenvolvimento do dossel: (a, b -  $P \leq 5,0$  mm) e (c, d -  $P > 5,0$  mm)



Fonte: Próprio autor.

Letras diferentes (a, b) representam uma mediana estatisticamente diferente ao nível de 1% pelo teste de Wilcoxon.

Esses resultados estão de acordo com a revisão realizada por Levia et al. (2017) que concluíram quem o dossel tem a capacidade de fracionar a gota em gotículas menores (Figura 14), embora o volume de P seja sempre maior que em TF, independentemente do total precipitado e estágio de desenvolvimento do dossel.

Apesar de 90% dos volumes de precipitação total se transformarem em precipitação interna quando a copa da vegetação apresentava baixa densidade foliar (primeira fase) as mesmas diferem ao nível de 1% (Figuras 14b e 14d) para a classe de chuva ( $P \leq 5,0$  mm). Com o aumento da densidade foliar do dossel durante o período chuvoso passa a ocorrer uma maior influência da vegetação na atenuação das chuvas. Nessa fase, o total precipitado convertido em precipitação interna foi de 72 e 80% para as classes de chuva  $P \leq 5,0$  mm e  $P > 5,0$  mm (Figura 14), estatisticamente diferente ao nível de significância de 1%.

Os resultados deste estudo podem apoiar estudos sobre processos erosivos em ambientes tropicais secos de baixa latitude, onde a natureza decídua da vegetação promove um impacto dinâmico na precipitação interna total, distribuição do tamanho das gotas e duração de TF em

diferentes estágios de desenvolvimento do dossel . Para eventos pluviométricos acima de 3 mm, o número de gotas de P é sempre menor que TF, ressaltando a importância do dossel no particionamento das gotas. No entanto, o efeito de partição do dossel torna-se constante após uma profundidade de chuva de 40 mm.

#### 6.4 CONCLUSÕES

O monitoramento das características da precipitação total (P) e precipitação interna (TF) indica que o caráter decíduo da floresta tropical seca promoveu mudanças na proporção de P convertida em TF, número total de gotas e volume total de gotas em relação à precipitação total.

No início da estação chuvosa, após o longo período seco e quando o dossel apresenta baixa densidade foliar, uma maior fração da chuva foi convertida em precipitação interna, que diminui à medida que a densidade foliar aumenta durante a estação chuvosa. Para eventos com precipitação total superior a 3 mm, o número de gotas de TF foi sempre superior ao de P, independente da precipitação total e estágio de desenvolvimento do dossel. Por outro lado, os diâmetros das gotas de TF foram menores que os de P, indicando que a vegetação quebra as gotas em gotas menores. Em resumo, a precipitação interna apresenta menor altura, maior duração e maior número de gotas com diâmetros menores do que a precipitação total, sendo as diferenças influenciadas pelo estágio de desenvolvimento do dossel.

Os achados deste estudo são úteis para quantificar o impacto de uma floresta tropical seca no particionamento das chuvas, contribuindo com informações cruciais para o manejo da água e do solo, bem como para a proposta de práticas conservacionistas. As características das chuvas impactadas pelo dossel afetam as condições de infiltração e o balanço hídrico geral na escala da encosta, incluindo a umidade do solo e a geração de escoamento. Além disso, a energia cinética da chuva, que depende das características das gotas, controla a erosividade da chuva e, conseqüentemente, a erosão do solo. Reconhecer o papel da vegetação na mudança das chuvas que atingem o solo da floresta permite o desenvolvimento de práticas de uso da terra mais sustentáveis.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e à Fundação Estadual de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) do Ceará pelo seu apoio financeiro para esta pesquisa. Agradecemos também a

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME, pelo fornecimento dos disdrômetros e assistência técnica.

---

## 7 ENERGIA CINÉTICA E POTENCIAL DE EROSIVIDADE DA PRECIPITAÇÃO INTERNA EM REGIÃO SEMIÁRIDA

---

**Resumo:** Devido à escassez de medições diretas e contínuas, relações empíricas ainda são largamente utilizadas na estimativa da energia cinética da chuva - EC e seu potencial de erosividade – EI30. Para preencher esta lacuna, instalamos dois disdrômetros, um para registrar a chuva total – P e outro sob o dossel de um fragmento da Floresta Tropical Seca – FTS para registrar a precipitação interna - TF, com os seguintes objetivos: (i) Analisar os dados medidos de EC da P, seu potencial de EI30 e o poder atenuante da FTS nas características de TF; (ii) avaliar a predição gerada pelos ajustes de dois modelos da literatura para estimar energia cinética (EC) e potencial de erosividade (EI30) da precipitação total (P) e TF; (iii) Propor um novo modelo de EC da P e TF com base em dados medidos em condições de campo. Os dados foram coletados de dezembro/2019 a maio/2021 em uma região semiárida, Nordeste do Brasil, totalizando 95 eventos de P e TF. A Relação entre EC e intensidade média de P e TF medida é melhor expressa em função do tempo ( $J m^{-2} h^{-1}$ ), através de um modelo linear ( $R^2 > 0.98 - P = 0.000$ ). Dentre os modelos utilizados, observou-se que o modelo Wischmeier e Smith (WS) foi o que mais subestimou os valores de EC e EI30 de P e TF. O modelo alternativo de EC pela variação temporal da intensidade apresentou o melhor ajuste aos dados medidos de EC e EI30 de P e TF para a região de estudo em comparação ao modelo WS. Diante dessa não adequação dos modelos de EC aos dados de P e TF, desenvolvemos um novo modelo, calibrado com 50% dos dados medidos de altura e intensidade média de P e depois validado com os outros 50%. Verificou-se que o novo modelo subestima a EC em 5% ( $R^2 = 0,98$ ) para P e superestima em 8% ( $R^2 = 0.97$ ) para TF, mostrando-se uma alternativa para substituir o modelo original de WS em regiões semiáridas com características similares. Além disso, o dossel da FTS reduz a EC medida em 25% e a EI30 em 39%, comprovando que dossel da vegetação arbórea protege a superfície do solo do impacto das gotas da chuva, além de ser uma cobertura natural do solo eficaz para proteção contra a erosão do solo.

**Palavras-chave:** energia cinética-intensidade da chuva; Erosividade da chuva; Disdrômetro; Semiárido.

---

**Kinetic energy and erosivity potential of throughfall in a semi-arid region**

---

**Abstract** - Due to the scarcity of direct and continuous measurements, empirical relationships are still widely used in estimating the kinetic energy of rainfall - EC and its erosivity potential - EI30. To fill this gap, we installed two disdrometers, one to record the total rainfall - P and the other under the canopy of a Tropical Dry Forest fragment - FTS to record the throughfall - TF, with the following objectives: (i) Analyze the data EC measurements of P, its EI30 potential and the attenuating power of FTS on TF characteristics; (ii) evaluate the prediction generated by fitting two models from the literature to estimate kinetic energy (EC) and erosivity potential (EI30) of total precipitation (P) and TF; (iii) Propose a new EC model of P and TF based on data measured under field conditions. Data were collected from December/2019 to May/2021 in a semi-arid region, Northeastern Brazil, totaling 95 P and TF events. The relationship between EC and mean intensity of P and measured TF is best expressed as a function of time ( $\text{J m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ), using a linear model ( $R^2 > 0.98 - P = 0.000$ ). Among the models used, it was observed that the Wischmeier and Smith (WS) model was the one that most underestimated the EC and EI30 values of P and TF. The alternative model of EC by temporal variation of intensity showed the best fit to the measured data of EC and EI30 of P and TF for the study region compared to the WS model. Faced with this non-adequacy of the EC models to the P and TF data, we developed a new model, calibrated with 50% of the measured data of height and mean intensity of P and then validated with the other 50%. It was found that the new model underestimates the EC by 5% ( $R^2 = 0.98$ ) for P and overestimates it by 8% ( $R^2 = 0.97$ ) for TF, proving to be an alternative to replace the original WS model in semi-arid regions with similar characteristics. Furthermore, the FTS canopy reduces measured EC by 25% and EI30 by 39%, proving that the tree canopy protects the soil surface from the impact of raindrops, in addition to being an effective natural soil cover to protect against soil erosion.

**Keywords:** kinetic energy-intensity of rainfall; rainfall erosivity; disdrometer; semi-arid.

## 7.1 INTRODUÇÃO

As regiões semiáridas de baixa latitude são caracterizadas fundamentalmente pelo regime de chuvas (Andrade et al., 2017), sua variabilidade espaço-temporal (Marengo et al., 2017), pela vegetação predominante - Floresta Tropical Seca (FTS), (Miles et al., 2006), e por serem altamente sensíveis às mudanças climáticas (Huang et al., 2016; Koutroulis, 2019). Nesses ambientes, a chuva é o principal aporte de água para o solo (Guerreiro et al., 2022), tornando-se uma variável chave para o entendimento dos processos hidrológicos dessa região (Medeiros e Araújo, 2014; Figueiredo et al., 2016), interações dossel-água-solo (Brasil et al., 2022a) e melhor gestão dos recursos naturais renováveis (Andrade et al., 2020).

Dentre essas interações, é necessário entender o potencial da vegetação em interceptar a água da chuva, a capacidade da vegetação em atenuar os eventos de precipitação que atingem o solo da floresta e o poder de redistribuição das gotas sob o dossel da vegetação (Levia et al., 2017; 2019). Nesse sentido, Brasil et al. (2020) identificaram que o dossel da FTS atenua a intensidade da precipitação interna - TF em 30-40%, fornecendo estimativas mais precisas da quantidade de água que efetivamente atinge o solo da floresta.

No entanto, a influência da distribuição dos pontos de gotejamento do dossel sob a vegetação nas características da energia cinética e erosividade de TF é pouco conhecida (Nanko et al., 2020). Ante esse cenário, estudos visam monitorar a redistribuição das gotas de TF em relação a chuva total em diferentes zonas climáticas do mundo (Zabret et al., 2017; Levia et al., 2017; 2019; Lüpke et al., 2019; Pinos et al., 2020; Nanko et al., 2020; 2022); no entanto, pouco se sabe sobre o potencial de redistribuição das gotas de TF em FTS (Brasil et al., 2022a). Outro processo que necessita ser investigado é como as gotas da redistribuição da chuva pela vegetação impactam a energia cinética medida sob o dossel da FTS em relação à chuva total - P e seu potencial de erosividade.

A carência de estudos em regiões semiáridas deve-se ao alto custo de obtenção de equipamentos específicos como os disdrômetros. O surgimento de equipamentos como disdrômetros permitiu a medição das características da chuva relacionadas ao diâmetro e velocidade das gotas. A partir dessas informações medidas, a energia cinética da chuva e seu potencial de erosividade podem ser obtidos diretamente, tanto para P como TF. Nos dias atuais muito ainda se usa relações empíricas para obter a energia cinética e seu potencial de erosividade (Oliveira et al., 2013; Medeiros e Araújo, 2014; Ramon et al., 2017; Santos et al., 2017; Panagos et al., 2017; Teixeira et al., 2022), com base na equação de Wischmeier e Smith

- WS (1978) modificada por Foster et al. (1981), pois requerem variáveis mais simples de entrada do que diâmetro e velocidade das gotas.

Medições precisas de energia cinética para estimativa real do potencial de erosividade da chuva auxiliarão no entendimento do poder atenuante da FTS em relação a P, além de fornecer informações precisas sobre o uso da equação WS para uma região semiárida de baixa latitude. Para preencher essa lacuna este estudo foi realizado com os seguintes objetivos: (i) Analisar os dados medidos de EC da P, seu potencial de EI30 e o poder atenuante da FTS nas características de TF; (ii) avaliar a predição gerada pelos ajustes de dois modelos da literatura para estimar energia cinética (EC) e potencial de erosividade (EI30) da precipitação total (P) e TF; (iii) Propor um novo modelo de EC da P e TF com base em dados medidos em condições de campo.

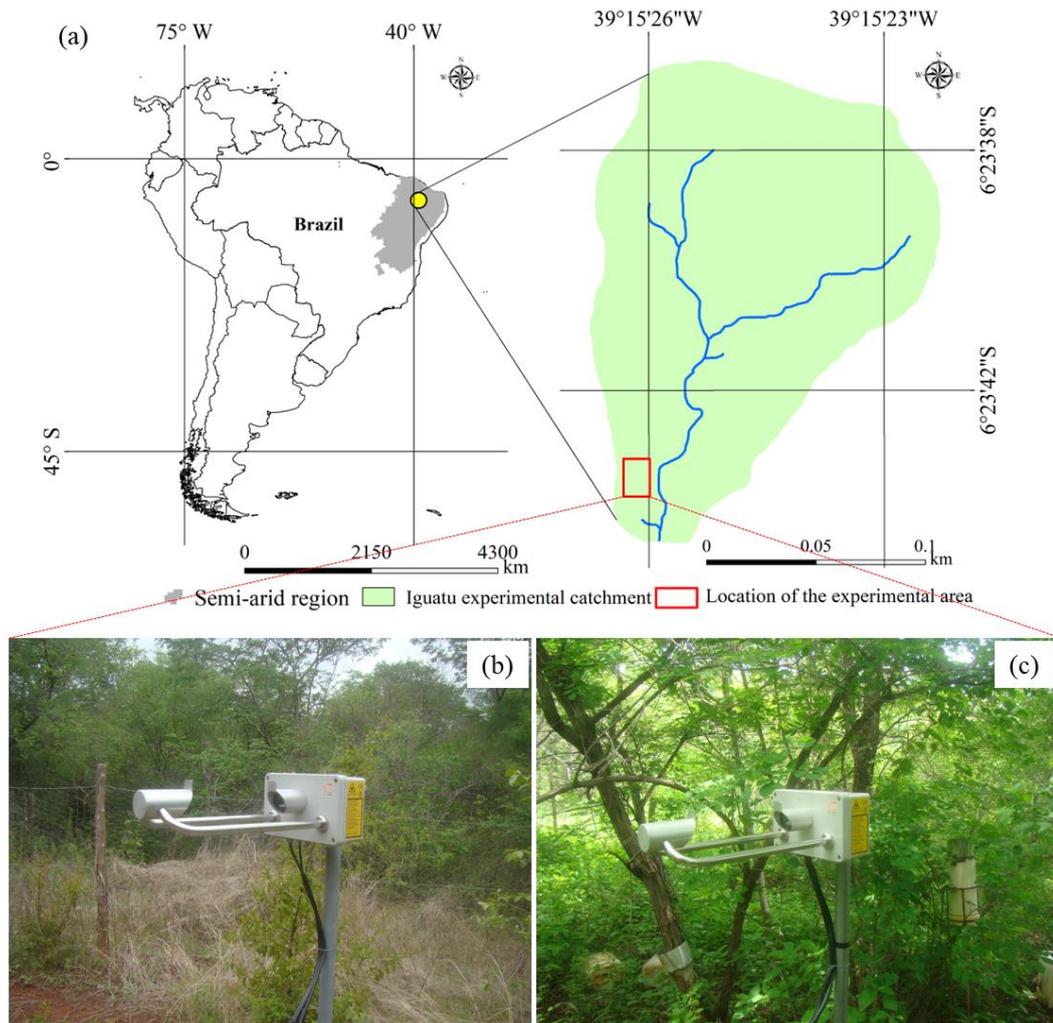
As descobertas deste estudo são úteis para entender a dinâmica de distribuição da energia cinética de P e TF na escala de evento de chuva em medida direta. Além disso, os resultados servirão de base para futuras investigações do potencial de erosividade do solo; estudos hidrológicos relacionados às características de P e TF; definição de práticas de conservação do solo e da água ante às mudanças climáticas.

## **7.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **Local de estudo**

A área de estudo está localizada no semiárido brasileiro, em uma microbacia experimental no município de Iguatu, Ceará, Nordeste do Brasil, entre as coordenadas geográficas 6°23'38'' a 6°23'42'' S e 39°15'23'' a 39°15'26'' W (Figura 15a), com altitude média de 217 m.

Figura 15 - Localização da microbacia experimental de Iguatu (a), disdrômetro em campo aberto para monitorar a chuva total (b), disdrômetro sob a vegetação para monitorar a precipitação interna (c)



Fonte: Próprio autor.

O clima predominante é o BSw'h' (semiárido quente), com temperatura média mensal sempre acima de 18 °C no mês mais frio e com estações chuvosa e seca bem definidas, segundo a classificação climática de Köppen. Com uma precipitação média anual de 998 mm, 84% concentram-se na estação chuvosa. Março e abril concentram 43% do total da chuva, com uma elevada ocorrência de dias secos consecutivos (Guerreiro et al., 2013). O semestre considerado seco ocorre de junho a dezembro, com aproximadamente 1% do total anual de chuvas, evidenciando a alta variabilidade temporal da precipitação na região de estudo (Campos et al., 2020). Apesar de se registrar uma alta precipitação anual, a evapotranspiração potencial anual

é de 2113 mm, com índice de aridez de Thornthwaite de 0,48, classificando a região como semiárida, onde o déficit hídrico é observado de 9 a 10 meses por ano (Guerreiro et al., 2021).

A microbacia experimental de Iguatu tem como vegetação predominante a Floresta Tropical Seca (FTS) que se encontra em regeneração desde 1978. De acordo com o levantamento fitossociológico, as espécies mais frequentes pertencem às famílias *Croton blanchetianus*, *Mimosa caesalpiniiifolia*, and *Aspidosperma pyriformium*, que representam 62% da densidade relativa total e altura média das árvores em torno de 5,2 m (Andrade et al., 2021).

### **Monitoramento da chuva com disdrômetros**

O monitor de precipitação a laser – disdrômetro – (Thies Clima 5.4110.xx.x00. V2.5x STD) fornece informações de 22 classes de diâmetro e 20 classes de velocidade das gotas de chuva registradas na área de detecção do aparelho (45,6 cm<sup>2</sup>). Os registros são efetuados a cada minuto. O resultado é um total de 440 colunas – matriz 22 x 20, conforme mostrado em (Thies Clima, 2007). A configuração experimental para funcionamento dos disdrômetros e armazenamento dos dados em nosso local de estudo é detalhada na pesquisa de Brasil et al. (2022a) e no capítulo 2 desta tese.

Este estudo foi realizado durante o período de dezembro/2019 a maio/2021, onde foram instalados dois monitores de precipitação a laser – disdrômetro, um em campo aberto para registro da precipitação total - P (Figura 15b) e um segundo sob o dossel da vegetação da FTS para registrar a precipitação interna - TF (Figura 15c). As posições dos disdrômetros foram fixas durante todo o período de medição e instalados a uma altura de 1,5 m, tendo como referência o nível do solo.

Além das características padrões de chuva, os disdrômetros registram características fundamentais da chuva, como diâmetros e velocidades das gotas. Diante disso, foram registradas as seguintes características em ambos os disdrômetros de P e TF: altura de chuva (mm), duração da chuva (h), intensidade média da chuva (mm h<sup>-1</sup>), intensidade máxima de chuva durante um período de 30 minutos do evento (I30 máx mm h<sup>-1</sup>), diâmetro da gota (mm), velocidade da gota (m/s), distribuição do tamanho da gota, número total de gotas, energia cinética total do evento de chuva (J m<sup>-2</sup>).

Todas as características mencionadas anteriormente foram registradas em intervalo de aquisição de 1 minuto e os eventos de chuva individuais foram separados por um tempo mínimo

entre eventos de chuva (MIET) de 6 horas (Brasil et al., 2022b). Com base nesse critério, durante o período de estudo ocorreram 95 eventos de chuva natural de P e TF.

### **Cálculo de energia cinética da chuva (EC) e erosividade (EI30)**

#### *Dados medidos de EC e EI30*

Com as informações do diâmetro das gotas fornecida pelo disdrômetro, determinamos massa, velocidade terminal e energia cinética. O formato das gotas deve ser levado em consideração, uma vez que não é o mesmo para todas as gotas ao longo do evento. No cálculo do formato das gotas empregamos os critérios propostos por Brandes et al. (2002) e Fernández-Raga et al. (2010), os quais são: i) gotas com  $\Phi < 1$  mm, assume-se a forma esférica; ii)  $1 < \Phi < 1,075$  mm, seguimos a proposta de Brandes et al. (2002); iii) para  $\Phi > 1,075$  mm, o raio horizontal teórico é calculado de acordo com a deformação de Brandes et al. (2002). Posteriormente, o volume das gotas em cada classe de diâmetro foi calculado por um ajuste polinomial de 12ª ordem (Fernández-Raga et al., 2010).

Para realizar o cálculo da energia cinética da chuva de P e TF, é necessário conhecer a velocidade de queda das gotas. Na literatura existem medidas da velocidade terminal das gotas de chuva (Gunn e Kinzer, 1949), as quais são limitadas à tamanhos de gota entre 0,125 e 5,8 mm. O disdrômetro empregado registra o tamanho de gota no intervalo de 0,125 a 8 mm. Para atender todos as classes de tamanhos de gotas, foi utilizado a equação polinomial de primeira ordem proposta por Fernández-Raga et al. (2010), que foi ajustado aos dados de Gunn e Kinzer (1949).

Diante desses ajustes, a energia cinética de P e TF, EC (J), de qualquer gota pertencente a uma determinada classe *i* de diâmetro  $\times$  velocidade foi calculada pelas equações 1 e 2:

$$E_c = \frac{1}{2} m_i \times v_i^2 \quad (1)$$

$$m_i = \frac{4}{3} \pi \times r_i^3 \times \rho \quad (2)$$

onde:  $v_i$  é a velocidade da gota ( $m s^{-1}$ ), ( $r_i$ , em m) é o raio médio da classe correspondente *i* que é usado para calcular a massa de cada gota,  $m_i$  (kg), e  $\rho$  ( $1000 kg m^{-3}$ ) é a densidade da água:

A energia cinética registrada a cada minuto (J) dividida pela área do equipamento ( $m^2$ ) obtém-se a EC total ( $J m^{-2}$ ). EC normalizada ( $J m^{-2} mm^{-1}$ ) deve ser calculado por: EC total ( $J m^{-2}$ ) / altura de chuva (mm) de P e TF. Para converter a EC normalizada ( $J m^{-2} mm^{-1}$ ) (EC mm) para EC expressa em  $J m^{-2} h^{-1}$  (EC tempo), obtida do disdrômetro, multiplica-se a (EC mm) pela intensidade média da chuva de P e TF. A conversão de unidades é feita da seguinte maneira: de ( $J m^{-2}$ ) para ( $MJ ha^{-1}$ ), multiplique por  $10^{-2}$  ou vice-versa.

O índice de erosividade da chuva EI30 foi estimado pela Equação 3.

$$EI30 = EC \text{ total} * I30\text{máx} \quad (3)$$

onde: EI30 é o índice de erosividade da chuva ( $MJ ha^{-1} mm h^{-1}$ ), EC total é a energia cinética total do evento de chuva ( $MJ ha^{-1}$ ), I30 é a intensidade máxima de chuva em 30 minutos do evento ( $mm h^{-1}$ ). Os valores de EC e EI30 foram estimados tanto para P como TF usando os dados medidos do local de estudo.

#### *Dados estimados de EC e EI30 por equações da literatura*

##### *Método 1: Modelo EC-EI30 por Wischmeier e Smith-WS*

A energia cinética (EC) por mm de chuva foi estimada usando a equação de Wischmeier e Smith – WS (1978), posteriormente modificada por Foster et al. (1981), equações 4 e 5. O EI30 de cada evento foi estimado pela equação 6. Os valores de EC e EI30 foram calculados tanto para P como TF usando a equação de WS.

$$EC = 0.119 + 0.0873 * \text{Log } I \quad (4)$$

$$EC \text{ total} = EC * P \quad (5)$$

onde: EC é a energia cinética da chuva em ( $MJ ha^{-1} mm^{-1}$ ), e I é a intensidade média da chuva em ( $mm h^{-1}$ ). EC total é a energia cinética total do evento de chuva ( $MJ ha^{-1}$ ), e P altura pluviométrica (mm).

$$EI30 = EC \text{ total} * I30\text{máx} \quad (6)$$

##### *Método 2: Modelo EC-EI30 pela variação temporal da intensidade da chuva-VT*

Para identificar a variabilidade temporal da intensidade da chuva ao longo de cada evento adotamos como intervalo de tempo 30 min intra-evento. Assim, a energia cinética ( $EC_r$ ) por mm de chuva é calculada para cada intervalo de tempo adotado – 30 min, usando a equação de Wischmeier e Smith (1978), posteriormente modificada por Foster et al. (1981), equações 7 e 8. O EI30 de cada evento foi estimado pela equação 9.

$$EC_r = 0.119 + 0.0873 * \text{Log } I_r \quad (7)$$

$$EC \text{ total} = \left( \sum_{r=1}^k EC_r * P_r \right) \quad (8)$$

onde:  $EC_r$  é a energia cinética da chuva ( $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ );  $I_r$  é a intensidade da chuva durante o intervalo de tempo adotado ( $\text{mm h}^{-1}$ ).  $EC \text{ total}$  é o somatório da energia cinética da chuva durante o intervalo de tempo adotado ( $\text{MJ ha}^{-1}$ ) multiplicado por  $P_r$  (total de chuva durante o  $r$ -ésimo período de tempo de um evento de chuva dividido em  $k$  partes ( $P \text{ mm}$ )).

$$EI30 = EC \text{ total} * I30_{\text{máx}} \quad (9)$$

Os valores de  $EC$  e  $EI30$  foram calculados tanto para  $P$  como  $TF$  usando a equação de  $WS$  modificada em função da variação temporal da intensidade da chuva. Mais detalhes da metodologia para cálculo de  $EC$  e  $EI30$  pela variação temporal, consulte os artigos de Panagos et al. (2017) e Yamaura et al. (2021).

### **Análise estatística dos dados**

Análises de regressão linear e gráficos de boxplot foram empregados para avaliar a distribuição dos dados de energia cinética e erosividade medida e estimada por diferentes metodologias para os dados de  $P$  e  $TF$ . A normalidade dos dados foi testada empregando-se o teste de Kolmogorov-Smirnov, que indicou uma série não normal. Assim, o teste não paramétrico da soma dos postos de Wilcoxon foi usado para comparar as medianas dos dados de  $P$  e  $TF$  ao nível de confiança de 99% nos dados de  $EC$  e  $EI30$ . Todas as análises estatísticas foram realizadas com o programa Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versão 16.0, MINITAB versão 18 e Excel.

### 7.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### Características da chuva - P e precipitação interna - TF

Durante o período de estudo (dezembro/2019 a maio/2021) ocorreram 95 eventos naturais de chuva (P) e precipitação interna (TF). De acordo com os resultados, P variou de 0.42 a 116.70 mm com mediana de 5.36 mm (Tabela 9), evidenciando uma alta frequência de eventos de baixa altura pluviométrica, conforme observado pelo percentil Q2-50%, comum em regiões semiáridas de baixa latitude (Guerreiro et al., 2021; Brasil et al., 2022a). Eventos de baixa altura pluviométrica são cruciais para estudos em Floresta Tropical Seca – FTS com foco, por exemplo, no processo de interceptação do dossel, pois a capacidade de armazenamento está na faixa de 0,5-1,0 mm (Medeiros et al., 2009; Brasil et al., 2020).

Tabela 9 - Estatísticas descritivas das características da chuva (P) e precipitação interna TF)

Variáveis	Chuva-P								
	Nº de eventos	Média	DP	Min	Max	Q1—25	Q2—50	Q3—75	
P		13.15	19.83	0.42	116.70	1.76	5.36	16.73	
P_Dur		4.27	2.61	0.22	11.42	2.20	3.83	6.42	
P_Iavg		3.00	3.51	0.17	17.25	0.77	1.88	3.66	
P I30 Máx		16.48	23.46	0.72	120.74	2.78	8.48	18.95	
P_nº de gotas		155,561	197,310	5,165	963,029	28,976	65,450	211,509	
P EC medida	95	3.76	6.58	0.05	32.86	0.23	1.03	3.88	
P EC por WS		2.85	5.03	0.02	26.49	0.19	0.75	3.29	
P EC pela Vt-Ws		3.54	6.08	0.04	30.11	0.21	1.00	4.00	
P EI30 Medida		196.60	587.50	0.03	3107.20	0.60	7.30	71.00	
P EI30 por WS		149.40	446.30	0.02	2504.80	0.50	5.90	49.80	
P EI30 pela Vt-Ws		184.80	547.30	0.03	2847.50	0.60	7.10	69.10	
		Precipitação interna-TF							
TF		10.77	15.89	0.18	84.72	1.31	4.30	13.77	
TF_Dur		4.55	2.64	0.37	11.95	2.37	3.97	6.73	
TF_Iavg		2.25	2.80	0.08	12.58	0.51	1.19	2.82	
TF I30 Máx		14.29	20.83	0.30	101.91	2.06	6.51	18.05	
TF_nº de gotas		224,468	271,639	5,789	1,341,238	33,165	105,456	340,700	
TF EC medida	95	2.84	4.56	0.02	20.86	0.18	0.82	3.37	
TF EC por WS		2.17	3.84	0.00	18.22	0.11	0.49	2.42	
TF EC pela Vt-Ws		2.78	4.79	0.01	21.57	0.14	0.69	3.36	
TF EI30 Medida		125.70	369.70	0.01	2088.50	0.40	5.30	49.20	
TF EI30 por WS		101.90	310.50	0.00	1697.40	0.20	3.00	31.40	
TF EI30 pela Vt-Ws		129.60	390.40	0.00	2109.50	0.30	4.60	43.00	

Fonte: Próprio autor.

P – Chuva (mm); TF – Precipitação interna (mm); Dur – Duração (h); Iavg – Intensidade média (mm h<sup>-1</sup>); I30 máx – Intensidade máxima em 30 minutos (mm h<sup>-1</sup>); EC - Energia cinética (MJ ha<sup>-1</sup>); WS - Wischmeier e Smith; Vt - variação temporal da intensidade; EI30 - Índice de erosividade (MJ ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>); Percentis-Q1—25th, Q2—50th (Mediana) e Q3—75th; SD-desvio padrão.

Em geral, as características de P medidas, foram maiores que as de TF devido ao processo de interceptação da chuva promovido pelo dossel da vegetação (Levia et al., 2017; Brasil et al., 2018; Nanko et al., 2020), exceto para os dados de duração da chuva e número total de gotas (Tabela 9). O maior número de gotas em TF é decorrente da quebra da gota quando entra em contato com a superfície da vegetação. No entanto esse comportamento pode mudar de acordo com o tipo de vegetação analisada (Nanko et al. (2020). Os referidos autores observaram que em plantação de Teca na Tailândia as gotas de TF eram menores em número, mas maiores em tamanho devido à coalescência das gotas de chuva sob o dossel.

Os resultados aqui obtidos comprovam que o dossel da FTS é importante na retenção temporária das chuvas, aumentando a duração das chuvas sob a vegetação, indicando que o dossel saturado continua direcionando as gotas da chuva para o solo após o término do evento (Tabela 9). Quanto ao número total de gotas, a maior concentração de gotas em TF quando comparado à P (Tabela 9), sugere que a morfologia/estágios de desenvolvimento do dossel da FTS afetam a distribuição do tamanho das gotas, dividindo-as em gotas menores. O aumento do número de gotas sob o dossel aumenta o tempo de contato da água com o solo, aumentando a oportunidade de infiltração e outros processos hidrológicos em áreas florestais (Nanko et al. 2006; Zabret et al., 2017; Levia et al. 2017, 2019; Lüpke et al., 2019; Pinos et al., 2020; Nanko et al., 2022).

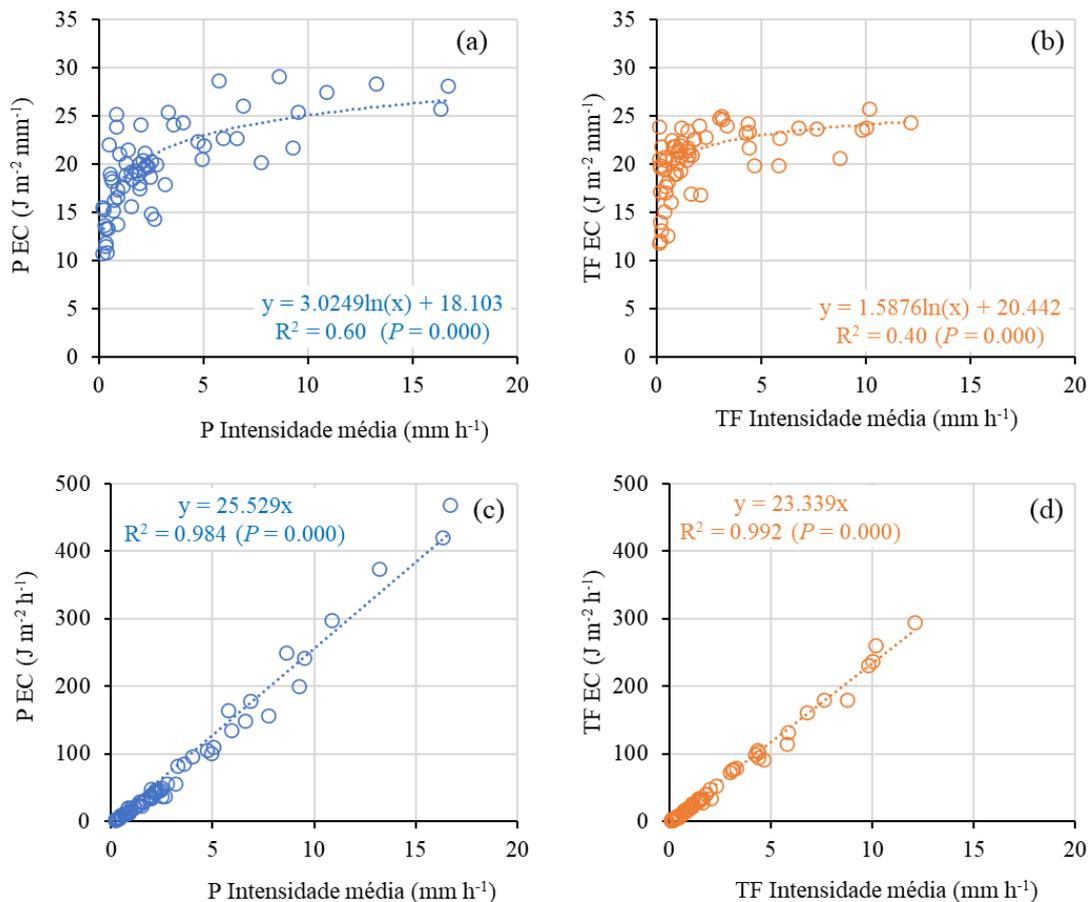
A influência da distribuição dos pontos de gotejamento do dossel sob a vegetação nas características da energia cinética e erosividade de TF é amplamente desconhecida como levantado por Nanko et al. (2020). Apesar da literatura já apontar o desenvolvimento de estudos abordando a redistribuição das gotas de TF em relação a P em diferentes zonas climáticas do mundo (Zabret et al., 2017; Levia et al., 2017, 2019; Lüpke et al., 2019; Pinos et al., 2020; Nanko et al., 2022), pouco se sabe sobre o potencial de redistribuição das gotas de TF em FTS (Brasil et al., 2022a). Os autores deste trabalho desconhecem estudos de como as gotas de redistribuição pelo dossel impactam a distribuição da energia cinética em relação à chuva total e seu potencial de erosividade em FTS.

### **Relação entre energia cinética e intensidade de P e TF medida**

Buscando entender como o dossel da FTS impacta a dinâmica de distribuição da energia cinética de TF, estabelecemos relações entre intensidade média da chuva e energia cinética medida para o local de estudo (Figura 16). Os dados de energia cinética da chuva são

apresentados em duas unidades padrão, comuns na literatura: Energia Cinética por unidade de área e altura de chuva (EC mm –  $\text{J m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ ) e Energia Cinética por unidade de área e tempo (EC tempo –  $\text{J m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) (Figura 16).

Figura 16 - Relação entre intensidade média da chuva e energia cinética (EC) medida pelo disdrômetro: (a, b) energia cinética por unidade de área e altura de chuva – (EC mm de P e TF) e (c, d) energia cinética por unidade de área e tempo – (EC tempo de P e TF)



Fonte: Próprio autor.

O modelo de melhor ajuste para expressar a relação entre intensidade média da chuva versus energia cinética normalizada (EC mm) de P e TF foi o logarítmico (Figura 16a e 16b). Já para expressar a energia cinética em função do tempo (EC tempo) para P e TF o modelo de melhor ajuste foi o linear (Figura 16c e 16d). Esses modelos são amplamente utilizados em estudos de erosão do solo, conforme discutido na revisão de Van Dijk et al. (2002) e nas pesquisas de Angulo-Martínez et al. (2016); Meshesha et al. (2016); Ramon et al. (2017).

Para os dados de P, os valores de EC mm variaram de 10.7 a 29.13  $\text{J m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ , com DP = 4.56  $\text{J m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ , enquanto EC tempo variou de 1.80 a 469.3  $\text{J m}^{-2} \text{h}^{-1}$  (DP = 102.7  $\text{J m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

(Figura 16a e 16c). Nossas observações estão em conformidade para valores máximos de EC mm normalizada que fica em torno de  $29.0 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  (Van Dijk et al., 2002; Angulo-Martínez et al., 2016; Nanko et al., 2020), quando os dados de EC mm de P são de alta qualidade.

A energia cinética normalizada (EC mm de TF) é menor devido ao efeito atenuante da vegetação, com valor máximo de  $25,70 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  e DP de  $3.32 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  (Figura 16b), os quais se assemelham aos valores máximos de EC mm para TF encontrados por Nanko et al. (2020). O referido autor comprovou que a energia cinética de TF muda de acordo com as posições do dossel de uma plantação de Teca na Tailândia, estando a maior energia cinética localizada na parte central do dossel.

A equação geral de energia cinética na unidade (EC mm) é apresentada na Figura 16a, com um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0.60 ( $P = 0.000$ ) para os dados de P e  $R^2$  de 0.40 ( $P = 0.000$ ) para os dados de TF (Figura 16b). Em outros estudos, também foram encontrados coeficientes de correlação nessa faixa de valores para P, como visto em Angulo-Martínez et al. 2016; Ramon et al. 2017, pois a energia cinética normalizada (EC mm) não apresenta uma relação linear com a intensidade média da chuva. Em estudo desenvolvido com simuladores de chuva (Meshesha et al., 2016) e em dados obtidos de revisões de literatura (Van Dijk et al., 2002) altos coeficientes podem ser encontrados, o que não é verdadeiro para ambientes naturais, visto a alta variabilidade dos eventos pluviométricos.

A qualidade do ajuste do modelo potencial ( $R^2 > 0.98 - P = 0.000$ ) para a energia cinética na unidade tempo em função da intensidade de chuva de P e TF (Figura 16c e 16d) mostrou-se como o modelo mais adequado na escala de eventos para P e TF em nosso estudo. Com as equações desenvolvidas é possível compreender o potencial erosivo das gotas de P e TF na escala de eventos, uma vez que esta variável está diretamente relacionada aos processos de desprendimento e transporte de sedimentos (Panagos et al., 2017, 2022; Nanko et al., 2020; Medeiros e Araújo, 2014; Santos et al., 2017). Os modelos desenvolvidos neste estudo usando dados de P e TF medidos oferecem suporte para estimativa da energia cinética da chuva e subsequente potencial de erosividade (EI30) em regiões semiáridas de baixa latitude com características climáticas semelhantes tanto pela unidade de EC mm como EC tempo.

Vale ressaltar que as relações de intensidade média versus energia cinética são funções do clima local e da microfísica da chuva do local onde são medidas. Assim, equações de intensidade média versus energia cinética derivadas empiricamente são válidas apenas para as regiões onde os dados foram medidos ou para regiões com características geográficas e

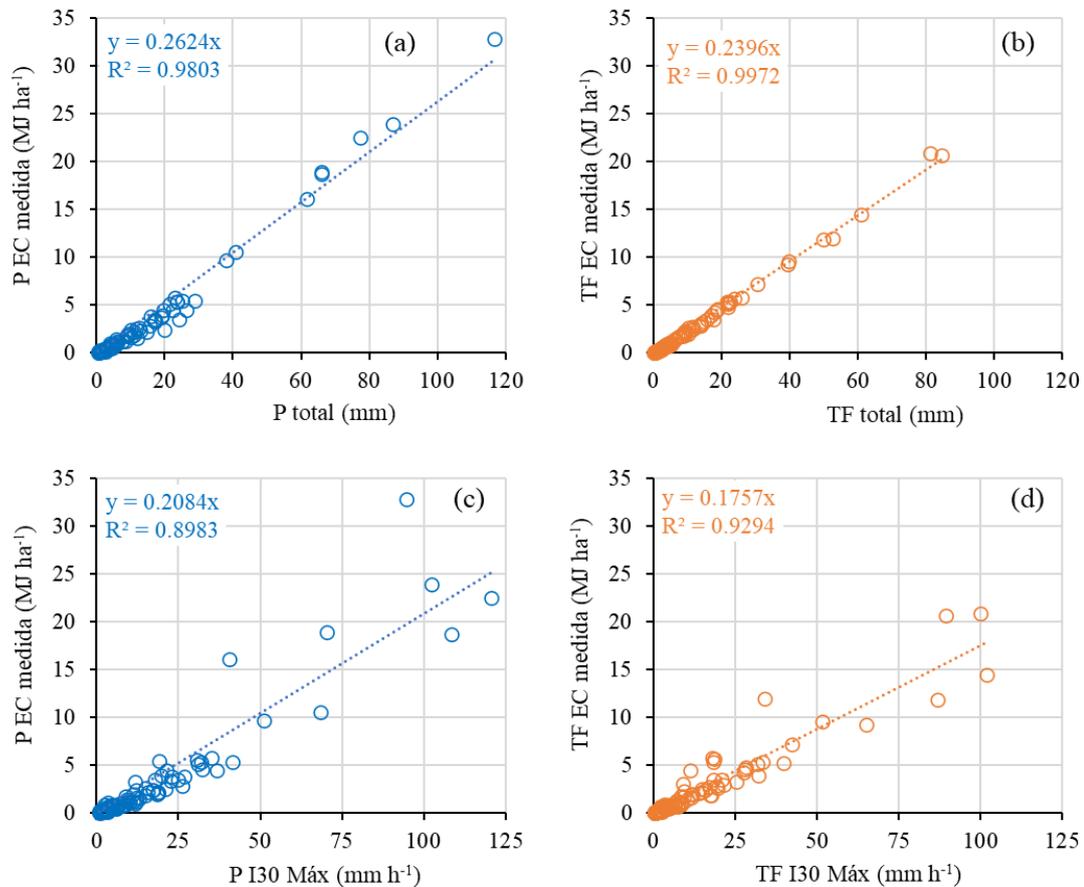
meteorológicas semelhantes. Por isso, existem várias fórmulas individuais de intensidade média versus energia cinética para diferentes localizações geográficas do mundo.

### **Modelos alternativos de EC e EI30 em função das características de P e TF total medida**

A falta de um banco de dados de energia cinética medida para a região semiárida do Nordeste do Brasil, faz com que este estudo tenha desenvolvido uma abordagem preliminar ao potencial uso do disdrômetro para medir a energia cinética da chuva e seu potencial de erosividade e correlacioná-lo com as características das chuvas medidas de P e TF na escala de eventos naturais de chuva.

Em alternativa aos modelos tradicionais utilizados na literatura de intensidade média da chuva versus energia cinética, propomos diferentes relações para estimar a energia cinética através de outras características da chuva facilmente obtidas por dispositivos mais simples, por exemplo: EC versus P total e TF total (Figura 17a e 17b) e EC versus I30 máx de P e TF (Figura 17c e 17d).

Figura 17 - Modelos alternativos de energia cinética medida pelo disdrômetro em função da chuva e I30 máx de P e TF total



Fonte: Próprio autor.

Dentre as características analisadas na escala de eventos de chuva, (P total) e (TF total) foi a variável mais facilmente disponível de obtenção, que apresentou a melhor correlação para estimar a energia cinética com forte ajuste,  $R^2 > 0.99$  (Figura 17a e 17b). Embora as relações de intensidade média versus energia cinética tenham um desempenho razoável na previsão da energia cinética normalizada (EC mm) (Figura 16), a EC real de cada evento versus P total e TF total (mm) foi prevista com precisão (Figura 17a e 17b).

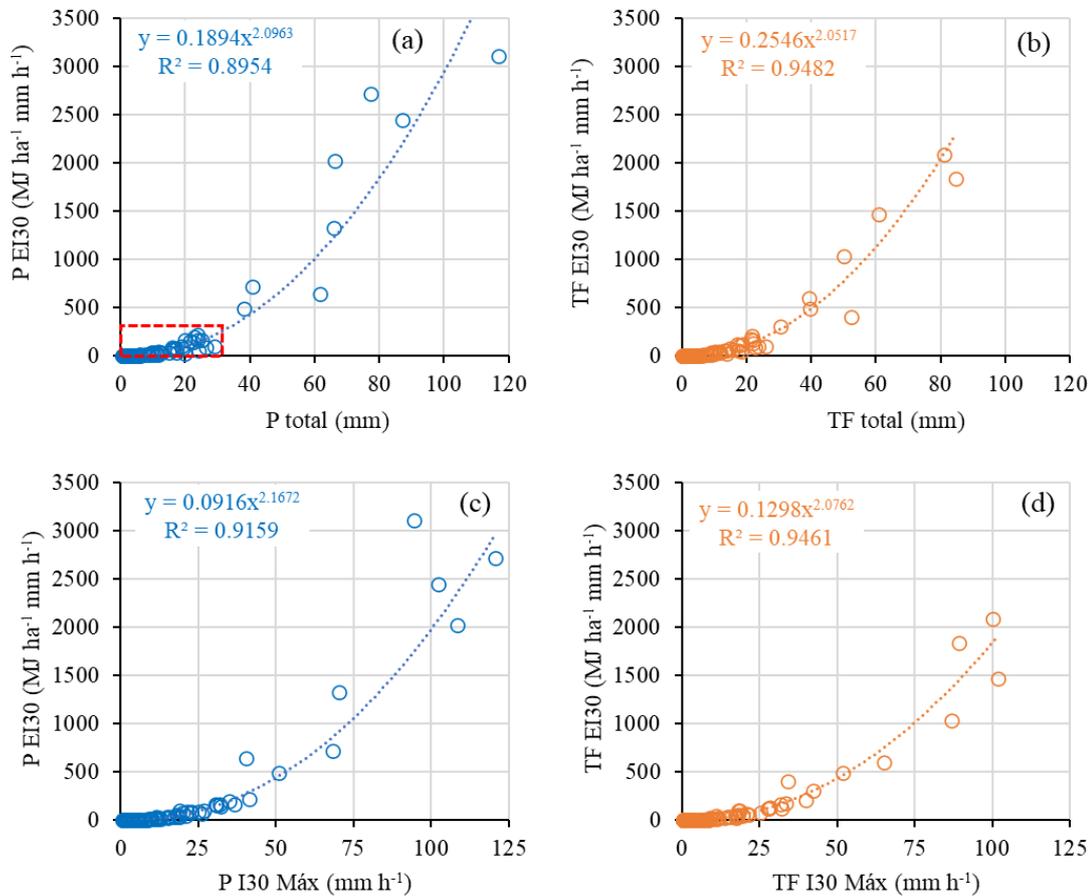
Os modelos propostos para estimar a energia cinética com dados de P total e TF total, apresenta uma relação linear (ver equação na Figura 17), em que a energia cinética aumenta de forma direta à medida que os valores de P e TF total aumentam. Os maiores valores de energia cinética (máximo de 32.8 MJ ha<sup>-1</sup> para P) e (máximo de 20.8 MJ ha<sup>-1</sup> para TF) ocorreram para os valores máximos de P e TF total, 116.6 mm e 84.7 mm, respectivamente) (Figura 17a e 17b), expressando uma relação direta.

A intensidade máxima da chuva em 30 minutos - I30 máx de P e TF também foi uma variável que apresentou boa correlação para estimar a energia cinética, ( $R^2 > 0.89$ ), mostrando-se ser uma alternativa para estimar a energia cinética de P e TF (Figura 17c e 17d), caso o local de estudo não tenha informações de outras variáveis relacionadas às características da chuva.

Em geral, os modelos alternativos de EC em função das características de P e TF total apresentados neste estudo para estimar a energia cinética apresentaram bons ajustes, evidenciado pelos altos valores do coeficiente de determinação (Figura 17). Com os dados de EC medidos *in loco* foi possível calcular o potencial de erosividade da chuva para os dados de P e TF. No entanto, nem sempre é possível obter a EC real de cada evento, sendo uma alternativa obter os valores de EI30 através de outras características da chuva (Figura 18) ou por meio de equações da literatura desenvolvidas para outros locais de estudo.

Os modelos de melhor ajustes para estimar a erosividade em função de P e TF total foi o potencial (Figura 18), com  $R^2$  de 0.89 e 0.94 para P e TF total (Figura 18a e 18b), respectivamente. Apesar de ser uma variável difícil de se obter, a intensidade máxima em 30 minutos - I30 máx pode prever a EI30 de P e TF com alto ajuste ( $R^2$  de 0.91 e 0.94) por meio de um modelo potencial (Figura 18c e 18d).

Figura 18 - Modelos alternativos de erosividade da chuva (EI30) em função da chuva e I30 máx de P e TF total



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 18a, 91.5% dos eventos de EI30 são menores que  $300 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ h}^{-1}$  e chuvas menores que 29 mm, como destacado pela linha tracejada na Figura 18a. No entanto, são registrados valores máximos de EI30 na ordem de  $3107.18 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ h}^{-1}$  para P e 2088.50 para TF  $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ h}^{-1}$  (Figura 18a e 18b), evidenciando altos valores de EI30 para região semiárida de baixa latitude.

Valores altos de EI30 de P na escala de eventos são comuns em regiões semiáridas, como visto na pesquisa de Medeiros e Araújo, (2014) que encontraram EI30 de  $2.806 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ h}^{-1}$  para Bacia experimental de Aiuaba-CE, para um evento de chuva de 82,8 mm, em que 95% da chuva ocorreu em um intervalo de 1 hora. Na Bacia Experimental de Iguatu-CE também foram encontrados valores altos, com EI30 máx de  $2868.9 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ h}^{-1}$  para uma chuva de 162 mm (Santos et al., 2017). Chuvas de grandes magnitudes são variáveis importantes de entrada para entender a variabilidade da EI30, pois esses eventos influenciam os processos hidrológicos e erosivos e, como tal, são essenciais para a definição de práticas de conservação

do solo e da água na adaptação das florestas às mudanças climáticas (Oliveira et al., 2013; Ramon et al., 2017; Panagos et al., 2017; Teixeira et al., 2022). Panagos et al. (2022) apontam para tendências altamente crescentes na média global de erosividade da chuva, que tendem a ser impulsionadas por mudanças em zonas climáticas específicas, em especial nas zonas áridas e semiáridas.

Os altos coeficiente de determinação de P e TF total para prever a EI30 sugerem que cerca de 89% e 94% da variação da erosividade é explicada pela altura da chuva para os dados de P e TF respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados por Hassan (2011) para chuvas naturais no Iraque, em que o valor de  $R^2$  foi de 0,83 para prever a relação entre EI30 versus P total.

No entanto, utilizando chuva simulada Meshesha et al. (2016), encontraram um coeficiente de determinação muito alto entre a altura da chuva e a erosividade ( $R^2 = 0,99$ ), sugerindo que cerca de 99% da variação da erosividade é explicada pelo total precipitado. De acordo com os autores, o modelo baseado em dados de chuva simulados deve ser aplicado à chuva natural com grande cautela porque as características da chuva (altura, duração, intensidade) são controladas, o que não ocorre em condições naturais de campo.

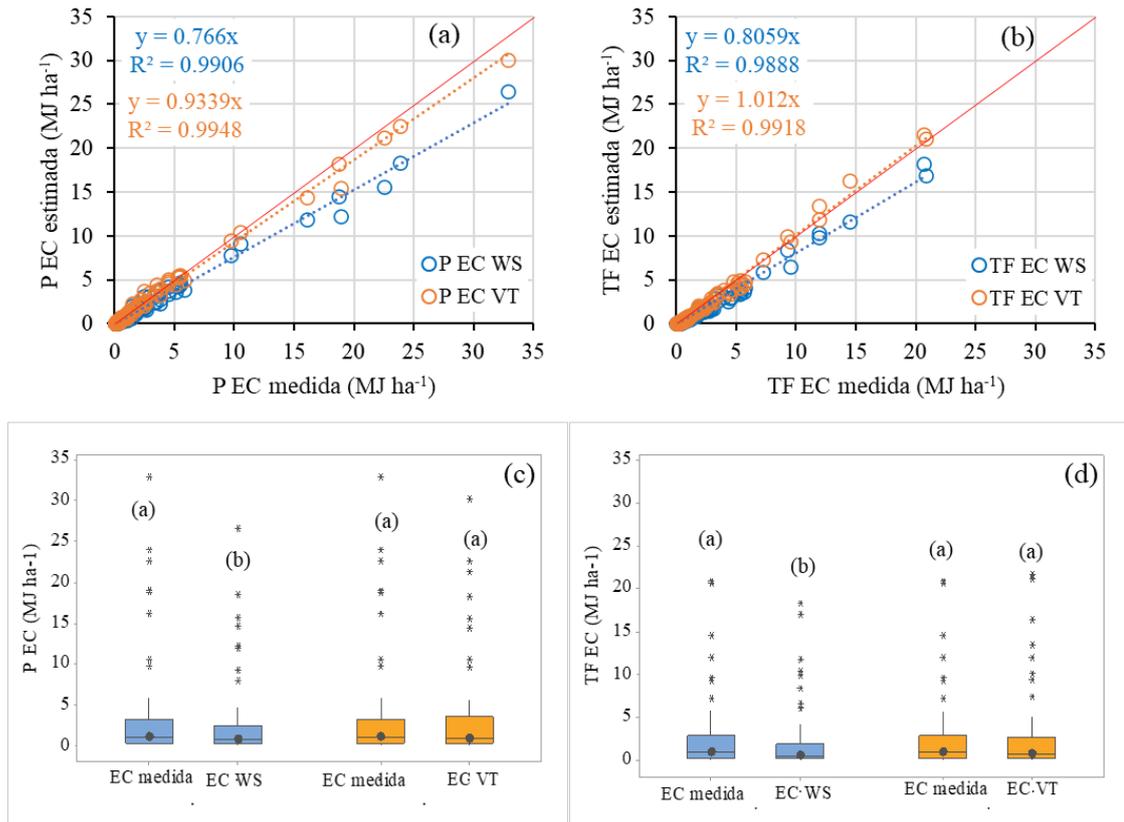
Embora a erosão hídrica seja identificada como a causa mais séria da degradação do solo em todo o mundo, os padrões globais de erosividade das chuvas permanecem pouco quantificados e as estimativas têm grandes incertezas, pois uma grande parte dos estudos utilizam equações desenvolvidas para outros locais (Panagos et al., 2017). De acordo com as equações fornecidas na Figura 18, a erosividade de P e TF pode ser estimada com alta precisão para regiões com características similares a deste estudo, com variáveis de simples obtenção, como P e TF total. Além disso, as equações de P e TF propostas neste estudo poderão ajudar na implementação de estratégias eficazes de mitigação e restauração da degradação do solo em áreas de FTS.

### **Equações da literatura para estimar Ec e EI30**

Devido à escassez de medições diretas e contínuas em condições de campo da energia cinética da chuva e seu potencial de erosividade em FTS comparamos os dados de energia cinética medidas pelo disdrômetro com dois modelos tradicionais da literatura (Figura 19). O modelo padrão de Wischmeier e Smith (1978) – EC WS de P e TF (Figura 19a e 19b), e modelo modificado de Wischmeier e Smith (1978) que calcula a energia cinética em função da variação

temporal da intensidade da chuva em intervalos de tempo fixos (por exemplo: 30 min) – EC VT de P e TF (Figura 19a e 19b). O modelo alternativo (EC e EI30 – VT), foi utilizado por apresentar bom desempenho em estudos erosivos, conforme demonstrado por Van Dijk et al. (2002); Panagos et al. (2017, 2022); Yamaura et al. (2021).

Figura 19 - Energia cinética de P e TF medida versus modelos da literatura



Fonte: Próprio autor.

Linha azul – modelo de Wischmeier e Smith (EC WS); Linha laranja – modelo de Wischmeier e Smith em função da variação temporal da intensidade da chuva (EC VT). \* Letras diferentes (a, b) representam uma mediana estatisticamente diferente ao nível de 1% pelo teste de Wilcoxon.

O modelo mais utilizado em estudos de erosão do solo em todo o mundo (EC WS) foi o que mais subestimou os dados medidos de EC em condições de campo. O referido modelo subestimou os dados de EC em 24% para P (Figura 19a) e em 20% para os dados de EC para TF (Figura 19b). Além disso, o modelo de EC WS mostrou-se ser estatisticamente diferente ao nível de 1% pelo teste de Wilcoxon em relação aos dados medidos de P e TF respectivamente (Figura 19c e 19d).

Acreditamos que o modelo padrão (EC WS) subestima os valores de EC (Figuras 5a e 5b) por utilizar a intensidade média de cada evento de chuva como variável de entrada, o que

não corresponde à realidade da distribuição da intensidade da chuva na escala intra-evento, ou seja, a intensidade da chuva não é constante durante todo o evento (Panagos et al., 2017, 2022; Yamaura et al., 2021). Ao contrário do que é assumido nos modelos de intensidade média versus energia cinética fixas, as mudanças nessa relação ocorrem dentro de um evento e entre eventos.

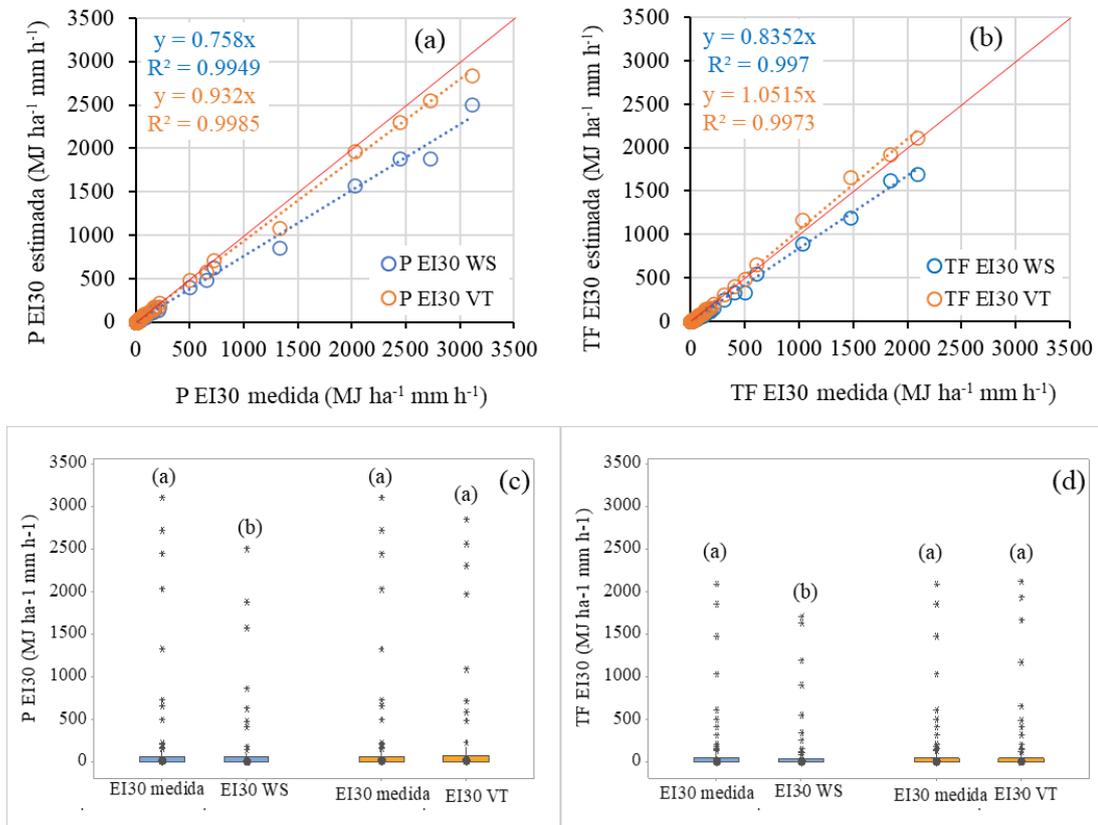
O modelo modificado de EC VT que calcula a variação temporal da intensidade da chuva em intervalos de tempo fixos ao longo do evento, mostrou-se ser a melhor equação para representar os dados de energia cinética para a região de estudo (Figura 19) em comparação com a equação padrão de EC WS. A equação EC VT subestima os dados de P em apenas 7% (Figura 19a), não apresentando diferença estatística ao nível de 1% em relação aos dados medidos de energia cinética (Figura 19c).

Para os dados de TF o modelo EC VT, também apresentou bom desempenho para representar os dados de EC medida, superestimando os dados de EC em apenas 1% (Figura 19b), não apresentando diferença estatística ao nível de 1% em relação aos dados medidos de EC TF (Figura 19d). Uma possível explicação para essa maior semelhança é devido ao maior número de gotas em TF (Tabela 9), fazendo com que o modelo de EC VT superestime os dados de energia cinética de TF na área de estudo.

Com base nos resultados, ressaltamos que a escolha imprópria de um modelo específico poderá resultar em erros significativos na estimativa de EC e EI30, conforme evidenciado pelo uso do modelo WS (Figura 19a e 19b). De acordo com os modelos de EC (Figura 19) e EI30 (Figura 20) apresentados, o modelo de EC VT pode ser usado com precisão para estimar a EC e EI30 de P e TF. As comparações das diferentes equações para estimar a EC fornecidas neste estudo são úteis para mostrar os erros gerados pelo uso de diferentes modelos desenvolvidas em regiões com outras condições climáticas. O modelo EC VT dará suporte a novos estudos que visam calibrar e validar modelos hidrológicos de erosão mais precisos e escolher melhores medidas de conservação do solo, tanto para P quanto para TF.

Com os dados medidos de energia cinética e intensidade máxima da chuva em 30 min (I30 máx) foi possível calcular o potencial de erosividade da chuva (EI30) na escala de eventos (Figura 20). Os dois modelos de EC utilizados neste estudo, também foram usados para estimar a EI30, no intuito de analisar os erros gerados na estimativa da EI30 em relação aos dados medidos de P e TF. Uma correta estimativa da EI30 é importante para entender a capacidade da chuva de separar as partículas do solo e iniciar a erosão, que é usada em modelos tradicionais de perda de solo (Wischmeier e Smith, 1958; Oliveira et al., 2013; Panagos et al., 2017, 2022).

Figura 20 - Erosividade de P e TF medida versus modelos da literatura



Fonte: Próprio autor.

Linha azul – modelo de Wischmeier e Smith (EC WS); Linha laranja – modelo de Wischmeier e Smith em função da variação temporal da intensidade da chuva (EC VT). \* Letras diferentes (a, b) representam uma mediana estatisticamente diferente ao nível de 1% pelo teste de Wilcoxon.

Para os dados de P, o modelo de EI30 WS também subestima a erosividade em 25% (Figura 20a), diferindo estatisticamente ao nível de 1% da EI30 medida (Figura 20c); enquanto o modelo EI30 VT subestimou a EI30 em 7% (Figura 20a) não apresentando diferença significativa ao nível de 1% da EI30 medida (Figura 20c). Esses resultados evidenciam a necessidade de um maior critério na seleção do modelo a ser empregado na estimativa da energia cinética para um determinado local. Como já discutido, a escolha de um modelo para estimar o EI30 não adequado teremos resultados equivocados, e não conseguiremos calcular com precisão os valores de perda de solo na escala dos eventos.

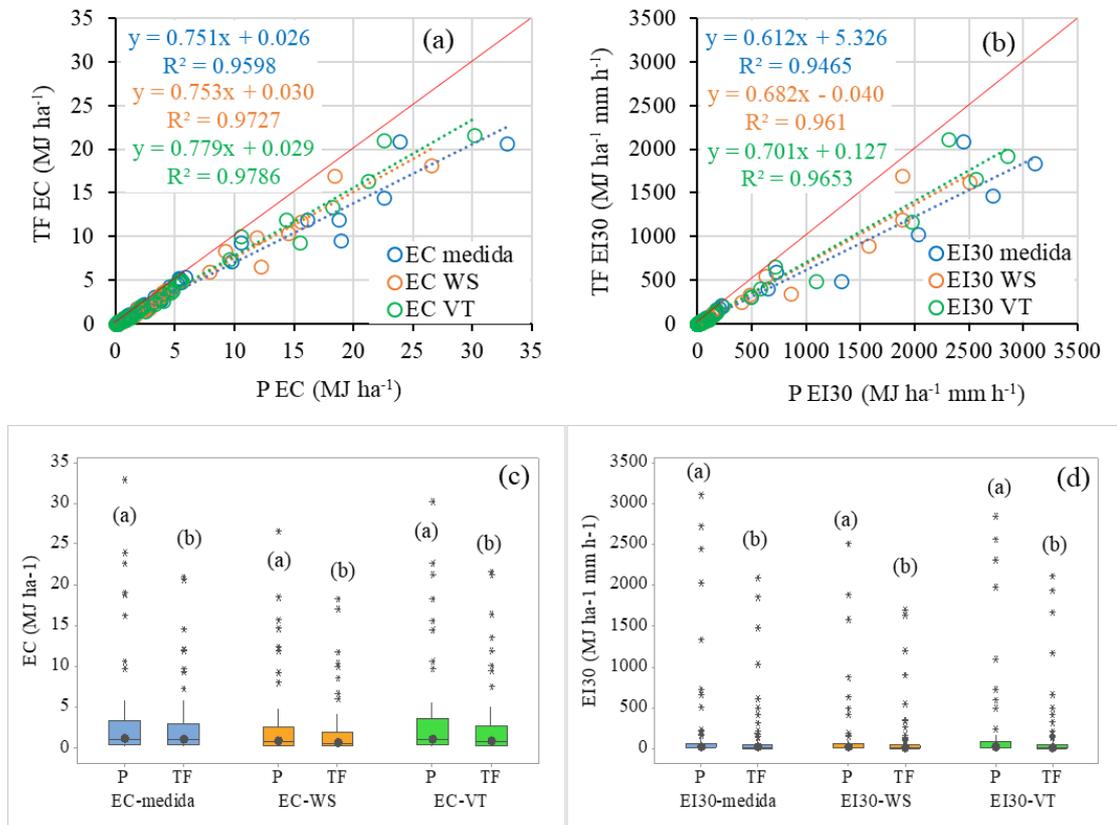
Para os dados de EI30 de TF (Figura 20b), o modelo EI30 WS subestima os valores na ordem de 17%, diferindo estatisticamente ao nível de 1% (Figura 20d); enquanto o modelo de EI30 VT superestima em apenas 1% os dados de EI30 (Figura 20b), não apresentando diferença estatística ao nível de 1% de significância (Figura 20d).

Como mostrado na (Figura 19), o uso de diferentes equações de EC para estimar o potencial de erosividade da chuva, além de mostrar diferença estatística em relação aos dados medidos – modelo de EI30 WS, faz com que uma escolha equivocada de um modelo adicione desvios à estimativa de erosividade (EI30). O modelo de EI30 VT pode ser usado com segurança para prever os dados de EI30 para P e TF. Uma vez estimados todos os parâmetros de maneira correta, os modelos permitem estimar as taxas de erosão em escalas espaço-temporais relevantes, o que é decisivo para o desenvolvimento de práticas sustentáveis de conservação e planejamento do uso da terra (Panagos et al., 2017, 2022).

### **Atenuação da vegetação nos dados de Ec e EI30 medidos e estimados de (P e TF)**

Buscando investigar como o dossel da FTS impacta na distribuição das características de TF em relação a P, investigou-se o efeito de atenuação do dossel da vegetação na estimativa da EC e EI30 medida (Figura 21). Investigou-se, também os resultados oriundos de modelos da literatura para estimar EC e EI30 na escala de eventos de chuva (Figura 21).

Figura 21 - Efeito atenuante da FTS nos valores de energia cinética e erosividade medida versus estimada de P e TF



Fonte: Próprio autor.

Linha azul - dados medidos; Linha laranja – modelo de Wischmeier e Smith (EC WS); Linha verde – modelo de Wischmeier e Smith em função da variação temporal da intensidade da chuva (EC VT). \* Letras diferentes (a, b) representam uma mediana estatisticamente diferente ao nível de 1% pelo teste de Wilcoxon.

Os resultados apontam que o dossel da FTS reduz a EC medida em 25%, enquanto os modelos de EC WS e EC VT reduzem em 25% e 23% (Figura 21a). Os dados medidos de EC P e os dois modelos testados são estatisticamente diferentes ao nível de 1% dos dados de EC TF (Figura 21c). O dossel da FTS atua como dissipador da energia cinética da precipitação, consequentemente, reduz seu potencial de erosividade do solo (Figura 21b e 21d). Os resultados seguiram os estudos clássicos, ou seja, a vegetação protege a superfície do solo do impacto das gotas da chuva (Chapman, 1948; Calder et al., 1993), em que as florestas são geralmente consideradas um uso efetivo da terra para proteger contra a erosão do solo (Nanko et al., 2020).

A EI30 medida reduziu em 39%, e os modelos de EI30 WS e EI30 reduziram, respectivamente, em 32% e 30% (Figura 21b). Todos os modelos apresentaram diferença estatística ao nível de 1% em relação aos dados medidos de EI30 P (Figura 21d).

A atenuação da energia cinética da gota da chuva pelo dossel reduz a possibilidade de fluxo Hortoniano (comum na região de estudo) e ajuda a controlar a erosão do solo no controle dos processos erosivos. A atenuação da intensidade da chuva pelo dossel da FTS pode chegar a 30-40% (Brasil et al., 2020). As relações de EC e EI30 medidas de TF em relação à P é útil para entender melhor as interações do dossel-água-solo, desenvolver mapas de alta resolução do risco potencial de erosão do solo e ajudar a manter a produtividade da floresta, como discutido por Nanko et al. (2020), em especial em FTS.

Embora não analisado neste estudo, o índice de área foliar – IAF pode modificar o tamanho e a velocidade das gotas de FT, o que, por sua vez, altera a energia cinética e a capacidade erosiva de TF (Goebes et al., 2015). De acordo com estudos recentes, o IAF e a altura do dossel das árvores foram os fatores mais importantes que influenciaram as diferenças na energia cinética de TF (Geißler et al., 2012; Goebes et al., 2015; Nanko et al., 2020).

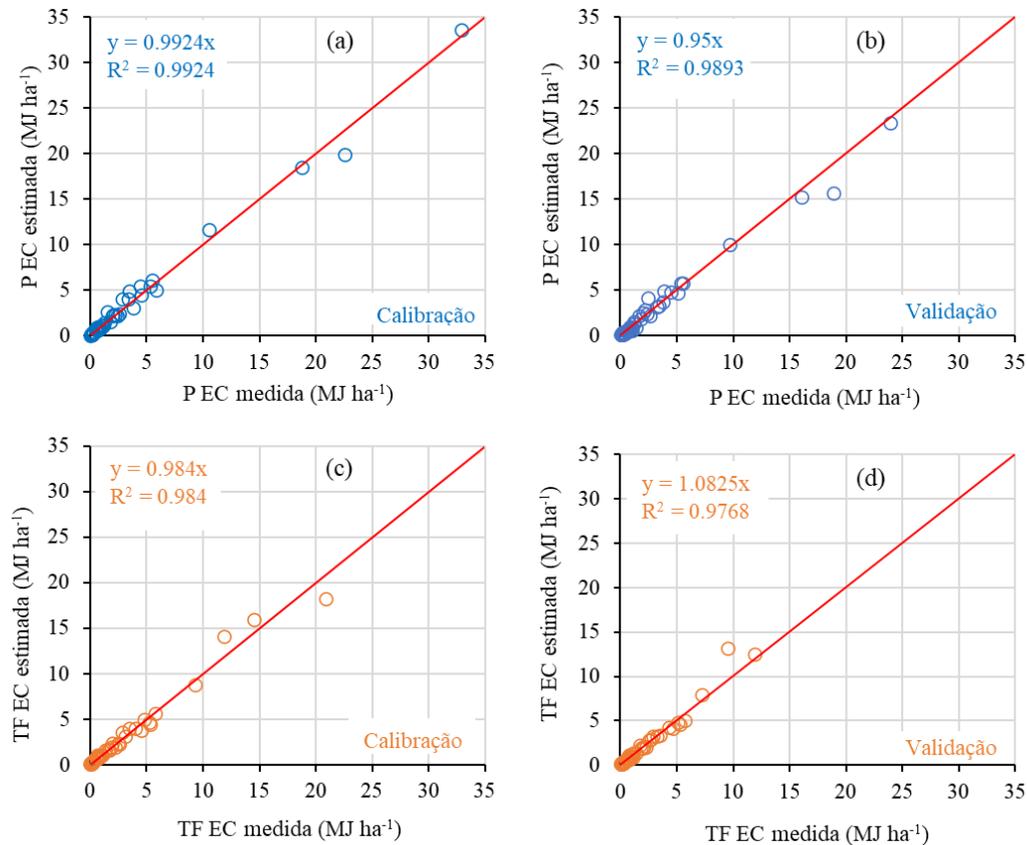
As informações aqui discutidas podem auxiliar os gestores na tomada de decisão, em que a manutenção da floresta nativa pode aumentar a oportunidade de infiltração, o armazenamento de umidade do solo, redução dos processos erosivos e assim, contribuir para a melhoria da qualidade e disponibilidade hídrica bem como para a qualidade do solo.

### **Ajuste dos parâmetros da equação de Ws com base nos dados medidos de P e TF**

Uma vez que o modelo WS é usado mundialmente em estudos hidrológicos, especialmente em estudos de erosividade da chuva, ajustamos os parâmetros do modelo original de WS em função dos dados medidos de altura e intensidade média da chuva em condição de campo (Figura 22a). Este ajuste foi proposto porque a aplicação da equação original WS diretamente aos dados subestimou os valores de energia cinética de P em 24% (Figura 19a).

Na tentativa de reduzir o erro nas estimativas de EC e EI30, calibramos e validamos os parâmetros do modelo WS original em função dos dados medidos para obter a EC (Figura 22a), o que resultou em uma maior similaridade entre valores medidos e estimados. De acordo com nossos resultados, o novo modelo calibrado (equação 10) subestima os dados de EC de P em apenas 1% com um  $R^2$  de 0,99 (Figura 22a) e em 5% o modelo validado (Figura 22b), evidenciando que o modelo proposto se aplica aos dados de EC.

Figura 22 - Nova equação de energia cinética de P e TF ajustada com base na equação original de WS



Fonte: Próprio autor.

Círculo azul – calibração e validação dados de P; Círculo laranja – calibração e validação dados de TF

#### Equação original de Wischmeier e Smith-WS

$$EC \text{ total} = (0.119 + (0.0873 * \text{Log I})) * P \quad (4)$$

#### Nova equação de energia cinética de P e TF

$$P \text{ EC total} = (0.1578 + (0.1049 * \text{Log I})) * P \quad (10)$$

$$TF \text{ EC total} = (0.1780 + (0.0300 * \text{Log I})) * P \quad (11)$$

Estimar a EC sob a vegetação é essencial para entender o poder de redistribuição das gotas e seu impacto direto no solo da floresta. Assim, o uso do modelo WS original subestima os dados de EC de TF em 20% (Figura 19b). Ajustamos os parâmetros da equação WS original usando os dados de altura e intensidade média de P. O modelo WS de TF calibrada e validade com dados de P vem a suprir a escassez e a limitação de informações da intensidade de sub sob o dossel da vegetação. Dispondo dos dados de P é possível estimar a energia cinética de TF com alta confiabilidade, erro < 0.02,  $R^2 = 0.98$ , (Figura 22c) pelo modelo calibrado. A aplicação

da equação de EC de TF calibrada (equação 11), aplicada aos dados de EC TF validada, superestima a EC em 8%, apresentando bom ajuste ( $R^2 = 0.97$ ). Os modelos propostos de EC para P e TF calibrado e validado com dados de medidos em campo é uma alternativa para substituir o modelo original de WS em regiões semiáridas com características similares a deste estudo. Além disso, é uma alternativa em estudos de processos erosivos em regiões semiáridas com características similares.

## 7.4 CONCLUSÕES

Durante 18 meses, dois disdrômetros foram instalados para monitorar as características da chuva total – P e precipitação interna – TF na Bacia experimental de Iguatu, Nordeste do Brasil. Em geral, as características de P medidas, foram superiores às de TF devido ao processo de interceptação da chuva promovido pelo dossel da Floresta Tropical Seca - FTS, exceto para os dados de duração da chuva e número total de gotas. O dossel da FTS reduz a energia cinética - EC medida em 25% e seu potencial de erosividade – EI30 em 39%, comprovando que dossel da vegetação arbórea protege a superfície do solo do impacto das gotas da chuva, além de ser uma cobertura natural do solo eficaz para proteção contra a erosão do solo.

A Relação entre EC e intensidade média de P e TF medida é melhor expressa em função do tempo ( $J m^{-2} h^{-1}$ ), através de um modelo linear ( $R^2 > 0.98 - P = 0.000$ ) do que pela altura da chuva ( $J m^{-2} mm^{-1}$ ).

Os dados de EC medidas pelo disdrômetro comprovam que, ao se utilizar modelos da literatura, são gerados erros na estimativa de EC e EI30 de P e TF. O modelo original de Wischmeier e Smith - WS foi o que mais subestimou os dados de EC (24% para P e 20% para TF) e EI30 (25% para P e 17% para TF). O modelo alternativo de EC pela variação temporal da intensidade mostrou-se o melhor modelo para representar os dados de EC e EI30 de P e TF para a região semiárida de estudo em comparação ao modelo WS.

Calibramos e validamos um modelo de energia cinética em função dos dados medidos de altura e intensidade média de P. O modelo validado, subestima a EC em 5% ( $R^2 = 0,98$ ) para P e superestima em 8% ( $R^2 = 0.97$ ) para TF, mostrando-se uma alternativa para substituir o modelo original de WS em regiões semiáridas com características similares. O modelo WS de TF calibrada e validade com dados de P vem a suprir a escassez e a limitação de informações da intensidade de sub sob o dossel da vegetação. De posse dos dados de altura e intensidade média de P é possível estimar a energia cinética de TF com alta confiabilidade. Os modelos

propostos de EC para P e TF calibrado e validado com dados medidos em campo é uma alternativa para substituir o modelo original de WS em regiões semiáridas com características similares a deste estudo.

As descobertas deste estudo são úteis para entender a dinâmica de distribuição da energia cinética de P e TF na escala de evento de chuva em medida direta. Além disso, os resultados servirão de base para futuras investigações do potencial de erosividade do solo; estudos hidrológicos relacionados às características de P e TF; definição de práticas de conservação do solo e da água ante às mudanças climáticas.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e à Fundação Estadual de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) do Ceará pelo seu apoio financeiro para esta pesquisa. Agradecemos também a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME, pelo fornecimento dos disdrômetros e assistência técnica.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação ao estudo para determinar o tempo mínimo entre eventos de chuva ao longo de 12 anos de registros contínuos de chuva natural, observamos que o MIET de 6 h é o mais adequado para caracterizar a distribuição das chuvas. Esses resultados confirmam nossa hipótese, na qual o MIET pode ser utilizado para separar e padronizar eventos de chuva estatisticamente independentes. Além disso, o estudo fornece meios para melhorar as simulações hidrológicas e sedimentológicas que têm as intensidades da chuva como um dos principais impulsionadores.

Em relação ao efeito do dossel na partição da chuva e distribuição do tamanho das gotas da precipitação interna nas FTS, nossa hipótese também foi confirmada: a precipitação interna apresenta menor altura, maior duração e maior número de gotas com diâmetros menores do que a precipitação total, sendo as diferenças influenciadas pelo estágio de desenvolvimento do dossel. As descobertas deste estudo são úteis para quantificar o impacto das características da chuva e estágio de desenvolvimento do dossel da FTS na partição da chuva e redistribuição das gotas da precipitação interna para melhor entender os efeitos do dossel sob a floresta nos processos de erosão do solo, balanço hídrico, umidade do solo e geração de escoamento em ambientes semiáridos.

Os dados de EC medidas pelo disdrômetro comprovam que, ao se utilizar modelos da literatura, são gerados erros na estimativa de EC e EI30 de P e TF, não confirmando nossa hipótese. O modelo original de Wischmeier e Smith - WS foi o que mais subestimou os dados de EC (24% para P e 20% para TF) e EI30 (25% para P e 17% para TF). O modelo alternativo de EC pela variação temporal da intensidade mostrou-se o melhor modelo para representar os dados de EC e EI30 de P e TF para a região semiárida de estudo em comparação ao modelo WS. Devido a não adequação dos modelos de EC aos dados de P e TF, propomos um novo modelo, calibrado com 50% dos dados medidos de altura e intensidade média de P e em seguida validado com os outros 50%. Constatou-se que o novo modelo subestima a EC em 5% ( $R^2 = 0,98$ ) para P e superestima em 8% ( $R^2 = 0,97$ ) para TF. O modelo WS de TF calibrada e validade com dados de P vem a suprir a escassez e a limitação de informações da intensidade de sub sob o dossel da vegetação.

Por fim, o dossel da FTS reduz a EC medida em 25% e a EI30 em 39%, comprovando que dossel da vegetação arbórea protege a superfície do solo do impacto das gotas da chuva, além de ser uma cobertura natural do solo eficaz para proteção contra a erosão do solo.

## 9 RECOMENDAÇÕES

Em trabalhos futuros recomendamos analisar como a dinâmica dos eventos pluviométricos separados pelo MIET de 6 h se relaciona com os processos hidrológicos e erosivos, tais quais: interceptação, infiltração, escoamento superficial, perda de solo, energia cinética e umidade do solo em regiões semiáridas tropicais.

Futuros estudos de monitoramento da precipitação interna em FTS, devem utilizar uma maior quantidade de disdrômetro sob o dossel da vegetação para amostrar com maior exatidão a variabilidade temporal das características de distribuição de energia das gotas. Outro ponto crucial é, caracterizar as informações de diâmetro, velocidade e energia cinética das gotas da precipitação interna sob o dossel de diferentes tipos de árvores da FTS, servindo de base para o entendimento dos processos hidrológicos dessa região.

Um outro ponto a ser considerado é investigar a variabilidade temporal da EC e EI30 da precipitação interna, em relação aos estágios de desenvolvimento do dossel. Isso permitirá uma melhor previsão da perda sazonal de solo em FTS. Até o momento, nas FTS não se sabe quais dos estágios de desenvolvimento do dossel (baixa densidade de folhas, alta densidade de folhas, senescência) conduzem as maiores entradas de EC e EI30 de TF na escala de eventos de chuva natural? Ao responder a esta pergunta, uma compreensão mais profunda das interações do dossel-solo em FTS será resolvida.

Monitorar as perdas por interceptação e a variabilidade temporal da precipitação interna do extrato herbáceo da FTS, com intuito de entender o papel dessa vegetação na distribuição temporal de água até a superfície do solo, bem como a manutenção da umidade do solo e geração de escoamento superficial.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. M., GUERREIRO, M. J. S., PALÁCIO, H. A. Q., E CAMPOS, D. A. Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 27, p. 100649, 2020a.
- ANDRADE, E. M., RODRIGUES, R. D. N., PALÁCIO, H. A. D. Q., BRASIL, J. B., E GUERREIRO, M. J. S. Hydrological behaviour of vertisols in the Brazilian semi-arid region: the importance of rainfall of less than 30 mm. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, 2020b.
- ANDRADE, E. M., AQUINO, D. N., COSTA, M. C. G., SANTOS, C. L. A., E ALMEIDA, A. M. M. How thinning in a seasonally dry tropical forest contributes towards root biomass, carbon stock and aggregate size in a Vertisol. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 15, 2021.
- ANDRADE, E. M., AQUINO, D. D. N., CHAVES, L. C. G., e LOPES, F. B. Water as capital and its uses in the Caatinga. In **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**; Silva, J.M.C., Leal, I.R., Tabarelli, M. (eds) *Caatinga*. Springer, Cham, p. 281-302, 2017.
- ALMEIDA, C.L., CARVALHO, T.R.A., DE ARAÚJO, J.C. Leaf area index of Caatinga biome and its relationship with hydrological and spectral variables. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 279, p. 107705, 2019.
- ANGULO-MARTÍNEZ, M., BEGUERÍA, S., E KYSELÝ, J. Use of disdrometer data to evaluate the relationship of rainfall kinetic energy and intensity (KE-I). **Science of the Total Environment**, v. 568, p. 83-94, 2016.
- BRANDES, E. A., ZHANG, G., E VIVEKANANDAN, J. Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment. **Journal of Applied Meteorology**, v. 41, n. 6, p. 674-685, 2002.

BRASIL, J. B., ANDRADE, E. M., PALÁCIO, H. A. Q., MEDEIROS, P. H. A., E SANTOS, J. C. N. Characteristics of precipitation and the process of interception in a seasonally dry tropical forest. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 19, p. 307-317, 2018.

BRASIL, J. B., ANDRADE, E. M., PALÁCIO, H. A. Q., SANTOS, J. C. N. D., E MEDEIROS, P. H. A. Temporal variability of throughfall as a function of the canopy development stage: from seasonal to intra-event scale. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 10, p. 1640-1651, 2020.

BRASIL, J. B., ANDRADE, E. M., PALÁCIO, H. A. Q., FERNÁNDEZ-RAGA, M., RIBEIRO FILHO, J. C., MEDEIROS, P. H. A., E GUERREIRO, M. S. Canopy Effects on Rainfall Partition and Throughfall Drop Size Distribution in a Tropical Dry Forest. **Atmosphere**, v. 13, n. 7, p. 1126, 2022a.

BRASIL, J.B.; GUERREIRO, M.S.; ANDRADE, E.M.; PALÁCIO, H.A.Q.; MEDEIROS, P.H.A.; RIBEIRO FILHO, J.C. Minimum Rainfall Inter-Event Time to Separate Rainfall Events in a Low Latitude Semi-Arid Environment. **Sustainability**, v. 14, n. 3, p. 1721, 2022b.

BARBOSA, L. R., ALMEIDA, C. D. N., COELHO, V. H. R., FREITAS, E. D. S., GALVÃO, C. D. O., E ARAÚJO, J. C. D. Sub-hourly rainfall patterns by hyetograph type under distinct climate conditions in Northeast of Brazil: a comparative inference of their key properties. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, 2018.

BESKOW, S., CALDEIRA, T. L., DE MELLO, C. R., FARIA, L. C., E GUEDES, H. A. S. Multiparameter probability distributions for heavy rainfall modeling in extreme southern Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 123-133, 2015.

CALDER, I. R., HALL, R. L., E PRASANNA, K. T. Hydrological impact of Eucalyptus plantation in India. **Journal of Hydrology**, v. 150, n. 2-4, p. 635-648, 1993.

CROCKFORD, R. H., E RICHARDSON, D. P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. **Hydrological processes**, v. 14, n. 16-17, p. 2903-2920, 2000.

CHIN, R. J., LAI, S. H., CHANG, K. B., JAAFAR, W. Z. W., E OTHMAN, F. Relationship between minimum inter-event time and the number of rainfall events in Peninsular Malaysia. **Weather**, v. 71, n. 9, p. 213-218, 2016.

COSTA, C. A. G., LOPES, J. W. B., PINHEIRO, E. A. R., ARAÚJO, J. C. D., E GOMES FILHO, R. R. Spatial behaviour of soil moisture in the root zone of the Caatinga biome. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 685-694, 2013.

COSTA, C. A. G., ARAÚJO, J. C. D., LOPES, J. W. B., E PINHEIRO, E. A. R. Permanence of water effectiveness in the root zone of the Caatinga biome. **Revista Caatinga**, v. 29, p. 692-699, 2016.

CAMPOS, D. A., ANDRADE, E. M., CASTANHO, A. D., FEITOSA, R. C., E PALÁCIO, H. A. Q. Biomass Dynamics in a Fragment of Brazilian Tropical Forest (Caatinga) over Consecutive Dry Years. **Applied Sciences**, v. 10, n. 21, p. 7813, 2020.

CHAPMAN, G. Size of raindrops and their striking force at the soil surface in a red pine plantation. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 29, n. 5, p. 664-670, 1948.

DUNKERLEY, D. Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 26, p. 5024-5036, 2008.

DUNKERLEY, D. How is the intensity of rainfall events best characterised? A brief critical review and proposed new rainfall intensity index for application in the study of landsurface processes. **Water**, v. 12, n. 4, p. 929, 2020.

DUNKERLEY, D. Intermittency of rainfall at sub-daily timescales: New quantitative indices based on the number, duration, and sequencing of interruptions to rainfall. **Atmospheric Research**, v. 253, p. 105475, 2021.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: EMBRAPA. 353 p. 2013.

ESTEVES, L. S. Consequences to flood management of using different probability distributions to estimate extreme rainfall. **Journal of Environmental Management**, v. 115, p. 98-105, 2013.

FERNÁNDEZ-RAGA, M., FRAILE, R., KEIZER, J. J., TEIJEIRO, M. E. V., CASTRO, A., PALENCIA, C., ... E MARQUES, R. L. D. C. The kinetic energy of rain measured with an optical disdrometer: An application to splash erosion. **Atmospheric Research**, v. 96, n. 2-3, p. 225-240, 2010.

FRASSON, R.P.M., E KRAJEWSKI, W.F. Characterization of the drop-size distribution and velocity-diameter relation of the throughfall under the maize canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 9, p. 1244-1251, 2011.

FATHIZADEH, O., HOSSEINI, S.M., ZIMMERMANN, A., KEIM, R.F., E DARVISHI, B.A. Estimating linkages between forest structural variables and rainfall interception parameters in semi-arid deciduous oak forest stands. **Science of the Total Environment**, v. 601, p. 1824-1837, 2017.

FERREIRA, A. G., E MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista brasileira de climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

FIGUEIREDO, J. V., DE ARAÚJO, J. C., MEDEIROS, P. H. A., E COSTA, A. C. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 13, p. 2390-2400, 2016.

FREITAS, E. D. S., COELHO, V. H. R., XUAN, Y., DE CD MELO, D., GADELHA, A. N., SANTOS, E. A., ... E ALMEIDA, C. D. N. The performance of the IMERG satellite-based product in identifying sub-daily rainfall events and their properties. **Journal of Hydrology**, v. 589, p. 125128, 2020.

FOSTER, G. R., MCCOOL, D. K., RENARD, K. G., E MOLDENHAUER, W. C.

Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Journal of Soil and water conservation**, v. 36, n. 6, p. 355-359, 1981.

GUNN, R., E KINZER, G. D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air.

**Journal of Atmospheric Sciences**, v. 6, n. 4, p. 243-248, 1949.

GUERREIRO, M. J. S., ANDRADE, E. M., ABREU, I., E LAJINHA, T. Long-term variation of precipitation indices in Ceará State, Northeast Brazil. **International Journal of**

**Climatology**, v. 33, n. 14, p. 2929-2939, 2013.

GUERREIRO, M. S., ANDRADE, E. M., PALÁCIO, H. A. Q., BRASIL, J. B., E RIBEIRO

FILHO, J. C. Enhancing Ecosystem Services to Minimize Impact of Climate Variability in a Dry Tropical Forest with Vertisols. **Hydrology**, v. 8, n. 1, p. 46, 2021.

GUERREIRO, M. S., ANDRADE, E. M., SOUSA, M. M. M., BRASIL, J. B., e PALÁCIO,

H. A. Q. Contribution of Non-Rainfall Water Input to Surface Soil Moisture in a Tropical Dry Forest. **Hydrology**, v. 9, n. 6, p. 102, 2022.

GOEBES, P., BRUELHEIDE, H., HÄRDTLE, W., KRÖBER, W., KÜHN, P., LI, Y., ... E

SCHOLTEN, T. Species-specific effects on throughfall kinetic energy in subtropical forest plantations are related to leaf traits and tree architecture. **PloS one**, v. 10, n. 6, p. e0128084, 2015.

GEIBLER, C., LANG, A. C., VON OHEIMB, G., HÄRDTLE, W., BARUFFOL, M., E

SCHOLTEN, T. Impact of tree saplings on the kinetic energy of rainfall-The importance of stand density, species identity and tree architecture in subtropical forests in China.

**Agricultural and Forest Meteorology**, v. 156, p. 31-40, 2012.

HASSAN, K. F. Application of rainfall intensity-kinetic energy relationship for soil loss

prediction. **Mesopotamia Journal of Agriculture**, v. 39, n. 2, p. 40-49, 2011.

HUANG, J., YU, H., GUAN, X., WANG, G., E GUO, R. Accelerated dryland expansion under climate change. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 2, p. 166-171, 2016.

IZIDIO, N. S. C., PALÁCIO, H. A. Q., ANDRADE, E. M., ARAÚJO NETO, J. R., E BATISTA, A. A. Interceptação da chuva pela vegetação da caatinga em microbacia no semiárido cearense. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 7, n. 1, 2013.

IGNACCOLO, M., E DE MICHELE, C. A point based Eulerian definition of rain event based on statistical properties of inter drop time intervals: An application to Chilbolton data. **Advances in Water Resources**, v. 33, n. 8, p. 933-941, 2010.

JIANG, Z.-Y.; ZHI, Q.-Y.; VAN STAN, J.T.; ZHANG, S.-Y.; XIAO, Y.-H.; CHEN, X.-Y.; YANG, X.; ZHOU, H.-Y.; HU, Z.-M.; WU, H.-W. Rainfall partitioning and associated chemical alteration in three subtropical urban tree species. **Journal of Hydrology**, v. 603, p. 127109, 2021.

KOUTROULIS, A. G. Dryland changes under different levels of global warming. **Science of The Total Environment**, v. 655, p. 482-511, 2019.

LEVIA, D.F., E FROST, E.E. Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems. **Progress in Physical Geography**, v. 30, n. 5, p. 605-632, 2006.

LEVIA, D.F., HUDSON, S.A., LLORENS, P., E NANKO, K. Throughfall drop size distributions: a review and prospectus for future research. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 4, n. 4, p. e1225, 2017.

LEVIA, D. F., NANKO, K., AMASAKI, H., GIAMBELLUCA, T. W., HOTTA, N., IIDA, S. I., ... E YAMADA, K. Throughfall partitioning by trees. **Hydrological Processes**, v. 33, n. 12, p. 1698-1708, 2019.

LÜPKE, M., LEUCHNER, M., LEVIA, D., NANKO, K., IIDA, S. I., E MENZEL, A. Characterization of differential throughfall drop size distributions beneath European beech and Norway spruce. **Hydrological Processes**, v. 33, n. 26, p. 3391-3406, 2019.

LOPES, D. C., NETO, A. J. S., DE QUEIROZ, M. G., DE SOUZA, L. S. B., ZOLNIER, S., E DA SILVA, T. G. F. Sparse Gash model applied to seasonal dry tropical forest. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125497, 2020.

LIMA, C. A. D., PALÁCIO, H. A. D. Q., ANDRADE, E. M. D., DOS SANTOS, J. C., E BRASIL, P. P. Characteristics of rainfall and erosion under natural conditions of land use in semiarid regions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 1222-1229, 2013.

LIMA, A. O., LYRA, G. B., ABREU, M. C., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., ZERI, M., E CUNHA-ZERI, G. Extreme rainfall events over Rio de Janeiro State, Brazil: Characterization using probability distribution functions and clustering analysis. **Atmospheric Research**, v. 247, p. 105221, 2021.

LINK, T. E., UNSWORTH, M., E MARKS, D. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, n. 3-4, p. 171-191, 2004.

MARENGO, J. A., TORRES, R. R., E ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil-past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, p. 1189-1200, 2017.

MURAKAMI, S. A proposal for a new forest canopy interception mechanism: Splash droplet evaporation. **Journal of Hydrology**, v. 319, n. 1-4, p. 72-82, 2006.

MILES, L., NEWTON, A.C., DEFRIES, R.S., RAVILIOUS, C., MAY, I., BLYTH, S.,..... GORDON, J.E. A global overview of the conservation status of tropical dry forests. **Journal of Biogeography**, v. 33, n. 3, p. 491-505, 2006.

MOCCIA, B., MINEO, C., RIDOLFI, E., RUSSO, F., E NAPOLITANO, F. Probability distributions of daily rainfall extremes in Lazio and Sicily, Italy, and design rainfall inferences. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 33, p. 100771, 2021.

- MOLINA-SANCHIS, I., LÁZARO, R., ARNAU-ROSALÉN, E., E CALVO-CASES, A. Rainfall timing and runoff: The influence of the criterion for rain event separation. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 64, n. 3, p. 226-236, 2016.
- MESHESHA, D. T., TSUNEKAWA, A., TSUBO, M., HAREGEWEYN, N., E TEGEGNE, F. Evaluation of kinetic energy and erosivity potential of simulated rainfall using Laser Precipitation Monitor. **Catena**, v. 137, p. 237-243, 2016.
- MEDEIROS, P. H. A., DE ARAUJO, J. C., E BRONSTERT, A. Interception measurements and assessment of Gash model performance for a tropical semi-arid region. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 40, n. 2, p. 165-174, 2009.
- MEDEIROS, P. H. A., E DE ARAÚJO, J. C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1216-1223, 2014.
- MEDINA-COBO, M. T., GARCÍA-MARÍN, A. P., ESTÉVEZ, J., E AYUSO-MUÑOZ, J. L. The identification of an appropriate Minimum Inter-event Time (MIT) based on multifractal characterization of rainfall data series. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 19, p. 3507-3517, 2016.
- MUŻYŁO, A.; LLORENS, P.; DOMINGO, F. Rainfall partitioning in a deciduous forest plot in leafed and leafless periods. **Ecohydrology**, v. 5, n. 6, p. 759-767, 2012.
- NANKO, K., HOTTA, N., E SUZUKI, M. Evaluating the influence of canopy species and meteorological factors on throughfall drop size distribution. **Journal of Hydrology**, v. 329, n. 3-4, p. 422-431, 2006.
- NANKO, K., MIZUGAKI, S., E ONDA, Y. Estimation of soil splash detachment rates on the forest floor of an unmanaged Japanese cypress plantation based on field measurements of throughfall drop sizes and velocities. **Catena**, v. 72, n. 3, p. 348-361, 2008.

NANKO, K., ONDA, Y., ITO, A., E MORIWAKI, H. Spatial variability of throughfall under a single tree: experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy.

**Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 9, p. 1173-1182, 2011.

NANKO, K., WATANABE, A., HOTTA, N., E SUZUKI, M. Physical interpretation of the difference in drop size distributions of leaf drips among tree species. **Agricultural and**

**Forest Meteorology**, v. 169, p. 74-84, 2013.

NANKO, K., HUDSON, S.A., E LEVIA, D.F. Differences in throughfall drop size distributions in the presence and absence of foliage. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 3, p. 620-627, 2016.

NANKO, K., TANAKA, N., LEUCHNER, M., LEVIA, D.F. Throughfall Erosivity in Relation to Drop Size and Crown Position: A Case Study from a Teak Plantation in Thailand. In **Forest-Water Interactions**: Levia, D.F., Carlyle-Moses, D.E., Iida, S., Michalzik, B., Nanko, K., Tischer, A. Ecological Studies, Springer, Cham. p. 279-298, 2020.

NANKO, K., KEIM, R. F., HUDSON, S. A., E LEVIA, D. F. Throughfall drop sizes suggest canopy flowpaths vary by phenophase. **Journal of Hydrology**, v. 612, p. 128144, 2022.

NÁVAR, J. Modeling rainfall interception loss components of forests. **Journal of Hydrology**, v. 584, p. 124449, 2020.

NOJUMUDDIN, N. S., YUSOF, F., E YUSOP, Z. Determination of minimum inter-event time for storm characterisation in Johor, Malaysia. **Journal of Flood Risk Management**, v. 11, p. S687-S699, 2018.

OLIVEIRA, P. T. S., WENDLAND, E., E NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: A review. **Catena**, v. 100, p. 139-147, 2013.

ONDERKA, M., PECHO, J., E NEJEDLÍK, P. On how rainfall characteristics affect the sizing of rain barrels in Slovakia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 32, p. 100747, 2020.

PANAGOS, P., BORRELLI, P., MEUSBURGER, K., YU, B., KLIK, A., JAE LIM, K., ... E BALLABIO, C. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 1-12, 2017.

PANAGOS, P., BORRELLI, P., MATTHEWS, F., LIAKOS, L., BEZAK, N., DIODATO, N., E BALLABIO, C. Global rainfall erosivity projections for 2050 and 2070. **Journal of Hydrology**, v. 610, p. 127865, 2022.

PATHAK, P., SUDI, R., WANI, S. P., E SAHRAWAT, K. L. Hydrological behavior of Alfisols and Vertisols in the semi-arid zone: Implications for soil and water management. **Agricultural Water Management**, v. 118, p. 12-21, 2013.

PINHEIRO, E.A.R.; METSELAAR, K.; DE JONG VAN LIER, Q.; DE ARAÚJO, J.C. Importance of soil-water to the Caatinga biome, Brazil. **Ecohydrology**, v. 9, n. 7, p. 1313-1327, 2016.

PINHEIRO, E.A.; COSTA, C.A.G.; ARAÚJO, J.C. Effective root depth of the Caatinga biome. **Journal of Arid Environments**, v. 89, p. 1-4, 2013.

PINOS, J., LATRON, J., NANKO, K., LEVIA, D. F., E LLORENS, P. Throughfall isotopic composition in relation to drop size at the intra-event scale in a Mediterranean Scots pine stand. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 9, p. 4675-4690, 2020.

QUEIROZ, M. G., DA SILVA, T. G. F., ZOLNIER, S., DE SOUZA, C. A. A., DE SOUZA, L. S. B., DO NASCIMENTO ARAÚJO, G., ... E DE MOURA, M. S. B. Partitioning of rainfall in a seasonal dry tropical forest. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 20, n. 2, p. 230-242, 2020.

RAMON, R., MINELLA, J. P., MERTEN, G. H., DE BARROS, C. A., E CANALE, T. Kinetic energy estimation by rainfall intensity and its usefulness in predicting hydrosedimentological variables in a small rural catchment in southern Brazil. **Catena**, v. 148, p. 176-184, 2017.

RESTREPO-POSADA, P. J., E EAGLESON, P. S. Identification of independent rainstorms. **Journal of Hydrology**, v. 55, n. 1-4, p. 303-319, 1982.

RIBEIRO FILHO, J. C., PALÁCIO, H. A. Q., ANDRADE, E. M., SANTOS, J. C. N., BRASIL, J. B. Rainfall characterization and sedimentological responses of watersheds with different land uses to precipitation in the semiarid region of Brazil. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 2, p. 468-478, 2017.

RASCÓN-RAMOS, A. E., MARTÍNEZ-SALVADOR, M., SOSA-PÉREZ, G., VILLARREAL-GUERRERO, F., PINEDO-ALVAREZ, A., SANTELLANO-ESTRADA, E., E CORRALES-LERMA, R. Soil Moisture Dynamics in Response to Precipitation and Thinning in a Semi-Dry Forest in Northern Mexico. **Water**, v. 13, n. 1, p. 105, 2021.

SADEGHI, S.M.M.; VAN STAN, J.T.; PYPKER, T.G.; TAMJIDI, J.; FRIESEN, J.; FARAHNAKLANGROUDI, M. Importance of transitional leaf states in canopy rainfall partitioning dynamics. **European Journal of Forest Research**, v. 137, p. 121-130, 2018.

SADEGHI, S.M.M.; GORDON, A.G.; VAN STAN, J.T. A Global Synthesis of Throughfall and Stemflow Hydrometeorology. In **Precipitation Partitioning by Vegetation: A Global Synthesis**; Van Stan, I.J.T., Gutmann, E.D., Friesen, J., Eds.; *Springer Nature*: Cham, Switzerland, p. 49-70, 2020.

SCHOU, W.C.; FORSTER, W.A.; MERCER, G.N.; TESKE, M.E.; THISTLE, H.W. Building Canopy Retention into AGDISP: Preliminary Models and Results. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 6. P. 2059–2066, 2012.

SCHOLES, R.J. The Future of Semi-Arid Regions: A Weak Fabric Unravels. **Climate**, v. 8, n. 3, p. 43, 2020.

SUDENE. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Resolução 115, de 23 de novembro de 2017. Disponível em: < <http://antigo.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>>. Acesso em: 14. abr. 2021.

SANTOS, J. C. N., ANDRADE, E. M., GUERREIRO, M. J. S., MEDEIROS, P. H. A., PALÁCIO, H. A. Q., E ARAÚJO NETO, J. R. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 1057-1066, 2016.

SANTOS, J. C. N., ANDRADE, E. M., MEDEIROS, P. H. A., GUERREIRO, M. J. S., E PALÁCIO, H. A. Q. Effect of rainfall characteristics on runoff and water erosion for different land uses in a tropical semiarid region. **Water Resources Management**, v. 31, n. 1, p. 173-185, 2017.

SANTOS, J. C. N., ANDRADE, E. M., MEDEIROS, P. H. A., PALÁCIO, H. A. Q., E ARAÚJO NETO, J. R. Sediment delivery ratio in a small semi-arid watershed under conditions of low connectivity. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, p. 49-58, 2017.

SANTOS, J. C. N. D., ANDRADE, E. M., PALÁCIO, H. A. D. Q., ARAÚJO NETO, J. R. D., E RIBEIRO FILHO, J. C. Erosive process control in the brazilian semiarid region. **Revista Caatinga**, v. 31, p. 695-703, 2018.

TANAKA, N., LEVIA, D., IGARASHI, Y., NANKO, K., YOSHIFUJI, N., TANAKA, K.,... E KUMAGAI, T.O. Throughfall under a teak plantation in Thailand: a multifactorial analysis on the effects of canopy phenology and meteorological conditions. **International Journal of Biometeorology**, v. 59, p. 1145-1156, 2015.

TEIXEIRA, D. B. S., CECÍLIO, R. A., MOREIRA, M. C., PIRES, G. F., E FERNANDES FILHO, E. I. Recent advancements in rainfall erosivity assessment in Brazil: A review. **Catena**, v. 219, p. 106572, 2022.

TOBA, T., E OHTA, T. An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests. **Journal of Hydrology**, v. 313, n. 3-4, p. 208-220, 2005.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THIES CLIMA. Instructions for use: Laser Precipitation Monitor 5.4110. xx. x00 V2. 4x STD. **Adolph Thies GmbH and Co**, v. 64, 2007.

TADROS, T.F. Interactions at interfaces and effects on transfer and performance. **Aspects Appl. Biol**, v. 14, p. 1-22, 1987.

VAN DIJK, A. I. J. M., BRUIJNZEEL, L. A., E ROSEWELL, C. J. Rainfall intensity–kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. **Journal of Hydrology**, v. 261, n. 1-4, p. 1-23, 2002.

VAN STAN, J.T., II.; FRIESEN, J. Precipitation Partitioning, or to the Surface and Back Again: Historical Overview of the First Process in the Terrestrial Hydrologic Pathway. In **Precipitation Partitioning by Vegetation**; van Stan, J., II., Gutmann, E., Friesen, J., Eds.; *Springer Nature*: Cham, Switzerland, p. 1-16, 2020.

WILKS, D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction*. Academic Press, San Diego, 1995.

WISCHMEIER, W. H., E SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning** (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.

YAMAURA, Y., YAMADA, Y., MATSUURA, T., TAMAI, K., TAKI, H., SATO, T., ... E SANO, M. Modeling impacts of broad-scale plantation forestry on ecosystem services in the past 60 years and for the future. **Ecosystem Services**, v. 49, p. 101271, 2021.

YUAN, J., EMURA, K., FARNHAM, C., E ALAM, M. A. Frequency analysis of annual maximum hourly precipitation and determination of best fit probability distribution for regions in Japan. **Urban climate**, v. 24, p. 276-286, 2018.

ZABRET, K., RAKOVEC, J., MIKOŠ, M., E ŠRAJ, M. Influence of Raindrop Size Distribution on Throughfall Dynamics under Pine and Birch Trees at the Rainfall Event Level. **Atmosphere**, v. 8, n. 12, p. 240, 2017.

ZABRET, K., RAKOVEC, J., E ŠRAJ, M. Influence of meteorological variables on rainfall partitioning for deciduous and coniferous tree species in urban area. **Journal of Hydrology**, v. 558, p. 29-41, 2018.

ZHANG, Y. F., WANG, X. P., HU, R., PAN, Y. X., E PARADELOC, M. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, northwestern China. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 1084-1095, 2015.

ZHANG, Z. S., ZHAO, Y., LI, X. R., HUANG, L., E TAN, H. J. Gross rainfall amount and maximum rainfall intensity in 60-minute influence on interception loss of shrubs: a 10-year observation in the Tengger Desert. **Scientific reports**, v. 6, n. 1, p. 1-10, 2016.

ZIMMERMANN, A., E ZIMMERMANN, B. Requirements for throughfall monitoring: the roles of temporal scale and canopy complexity. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 189, p. 125-139, 2014.